

PROS Y CONTRAS AMBIENTALES DEL MERCADO LIBRE

ESTRELLAS CANIBALES

¿RESURRECCION DE GENES EXTINGUIDOS?

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

CONMUTADOR DE SILICIO

ENERO 1994
700 PTAS.

INVESTIGACION y CIENCIA

Enero de 1994 Número 208

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Martínez Alier: *En defensa del libre comercio* y *Los peligros del libre comercio*; Esteban Santiago: *Química de las comunicaciones cerebrales*; Mónica Murphy: *Binarias de rayos X*; Luis Bou: *Colocaciones de círculos*; Santiago Torres: *ADN prehistórico*; J. Vilardell: *Hace...*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

Luis Bou y Joandomènec Ros

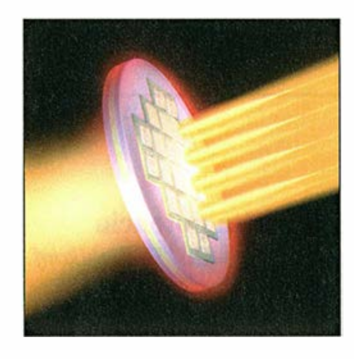
Ciencia y empresa:

J. M.ª V. Martínez y Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Michael Goodman

Página	Fuente
5	Peter Sis
6-7	Steven Ferry/Matrix
8	Ian Worpole
9-10	Steven Ferry/Matrix
11	Peter Sis
12-13	Jean Guichard/Sygma
14-16	Ian Worpole
17	Peter Sis
19	Roberto Osti
20	Jean-Louis Dubois/Jacana
22	Roberto Osti
23-25	Dimitry Schidlovsky
38	Jared Schneidman
39	Alfred T. Kamajian
40-45	Jared Schneidman
48-55	Documentos Pour la Science
56-57	Stephanie Rausser
58-59	Michael Goodman
60	Ian Worpole
61	Cortesía de Karl E. Stahlkopf
63	Cortesía de Red Eléctrica de España
65	Jonathan Blair/Woodfin Camp
66-67	Ed Bridges/Museo Americano de Historia Natural (*arriba a la derecha*), Tomo Narashima (*abajo*)
69	Patricia J. Wynne
70	Thomas Stephan/ Black Star
73-77	Manuel García Doncel



La portada muestra un tiristor controlado por MOS, dispositivo que maneja electricidad a altas tensiones. La corriente que entra y sale del mismo se representa por haces luminosos. En los tiristores se combina la electrónica de alta potencia con las técnicas de fabricación de circuitos integrados de silicio. El aumento de la capacidad de las líneas de transporte en alta tensión haría que las compañías eléctricas ahorrasen una gran cantidad de dinero (véase "Electrónica de alta potencia", por Narain G. Hingorani y Karl E. Stahlkopf, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

....*cincuenta años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Pese a que todo el mundo sabe que no se puede talar sin tiento los bosques de manera indefinida, muchos fabricantes de pasta de papel han seguido haciéndolo alegremente, con poca o ninguna preocupación por el futuro. En consecuencia, la reserva forestal de los Estados Unidos es hoy escasa y las vastas regiones boscosas de Canadá corren el riesgo de quedar esquilmadas. Añadamos a esto las nuevas aplicaciones de la madera que se han desarrollado en los últimos años (plásticos, explosivos, obras de construcción, y son sólo unos ejemplos) y es evidente que a menos que algo se haga, y que se haga enérgicamente y a conciencia, la industria papelera va a enfrentarse después de la guerra a una crisis aún mayor que la de hoy.»

«Merced a uno de los logros más espectaculares propiciados por la guerra, se han abierto al tráfico aéreo dos áreas ciegas de la superficie terrestre que suman casi 25 millones de kilómetros cuadrados. En cualquier lugar que esté a menos de 2000 kilómetros de los polos magnéticos, las brújulas magnéticas comienzan a bailotear y los aviones penetran en una sombría tierra de nadie; en ella está comprendida buena parte de Canadá. Ahora, gracias a la brújula electromagnética giroscópica, desarrollada por técnicos de la Bendix Aviation Corporation, el problema ha quedado resuelto. El corazón de esta nueva brújula lo forman tres imanes con doble arrollamiento dispuestos como lados de un triángulo equilátero. En cada imán se genera una tensión eléctrica distinta en función del ángulo con que el compás corte las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. La indicación que presenta la esfera del instrumento se basa en la combinación de esos ángulos y, por tanto, de las tensiones generadas. La corriente resultante, amplificada por tubos de vacío, es aumentada hasta una potencia suficiente para accionar un motor eléctrico, cuyo eje mueve la aguja de la esfera.»

«La tendencia actual en el empleo de productos químicos para la lucha contra el fuego acentúa más los aspectos preventivos que la extinción de los incendios, afirma H. L. Miner, gerente de la División de Protección contra el Fuego y Seguridad de Du-Pont. Señala que se puede ahora tratar químicamente el papel, la tela y la madera para que no extiendan las llamas. Hasta tal punto retarda el fuego la madera tratada químicamente, que en la escala de combustibilidad ocupa un lugar más cercano al amianto que a la madera ordinaria.»

...*cien años*

SCIENTIFIC AMERICAN: «Ha señalado Monsieur Flammarion, el astrónomo francés, que el continente europeo está atravesando un período frío. Durante los últimos seis años la temperatura media de París ha sido en unos dos grados inferior a la normal, y en Gran Bretaña, Bélgica, España, Italia, Austria y Alemania el frío ha aumentado.»

«M. Carey ofrece un interesante informe acerca de sus experimentos con sales de distintas sustancias sometidas a grandes presiones. "Hay razones, dice, para concluir que muchas de las sales de metales fácilmente reducibles, sobre todo las de plata, mercurio y platino, se reducen por efecto de la presión. Estas reacciones son endotérmicas, lo que nos lleva a deducir que la acción mecánica puede desencadenar reacciones que requieran aporte de energía. La fuerza mecánica les proporciona energía del mismo modo que la luz, el calor y la electricidad se la proporcionan a los cambios endotérmicos que provocan."»



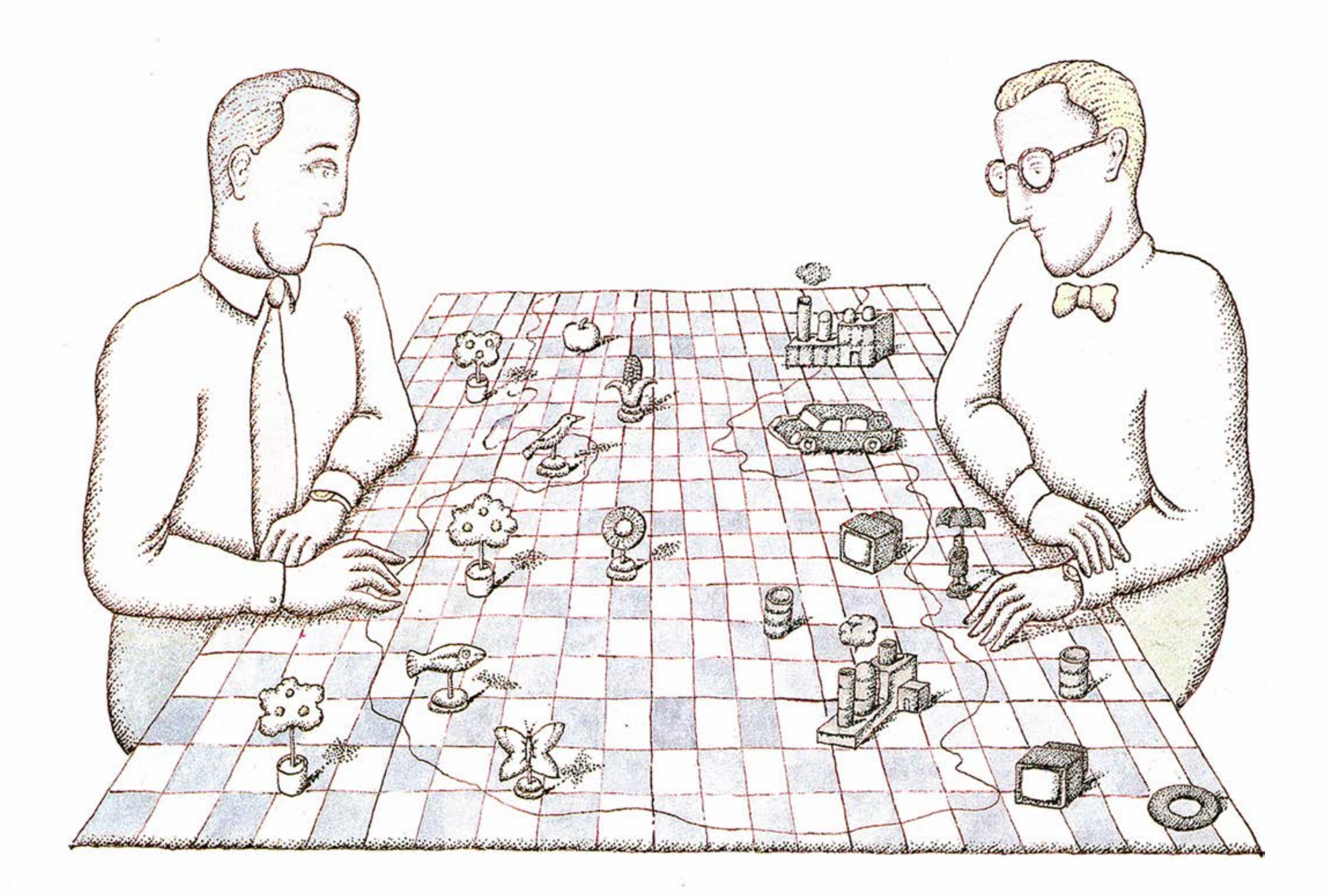
El ave del paraíso

«En *Nineteenth Century*, un escritor cuyo nombre es Robinson adelanta una explicación muy verosímil de que, mientras la mayoría de los integrantes del reino animal parecen nadar por intuición, el hombre sea casi el único que necesita de un aprendizaje para mantener la cabeza por encima del agua. Según él, la razón estriba en que descendemos de especies que habitaban en rocas y cavernas y trepaban por rocas y árboles. Sostiene que el instinto heredado hace que el hombre tienda, por desgracia, a *trepar* ante el peligro. Por consiguiente, a menos que se le haya enseñado a nadar, proyecta ambos brazos a la vez por encima de la cabeza, con lo que aumenta el peso sobre ella y, claro está, se hunde.»

«Mlle. Klumpke, que acaba de obtener el grado de Doctor en Ciencias Matemáticas por la Sorbona, es la primera dama que logra esa distinción. He aquí una traducción de los elogiosos términos en que M. Darboux se dirigió a la talentosa autora al entregarle el título: "Los grandes nombres de Galileo, Huyghens, Cassini y Laplace están unidos a la historia de cada uno de los grandes progresos habidos en la atractiva pero difícil teoría de los anillos de Saturno. No es nimio lo que usted, con su obra, aporta a ese campo. La Facultad ha decidido por unanimidad declararla merecedora del grado de Doctor."»

«Por amabilidad de Mr. W. Stoffregn, importador de pájaros, nos es posible ofrecerles una ilustración de la hermosa ave del paraíso. Habita en Africa Occidental. El macho, cuando su plumaje está en todo su esplendor, es negro subido en las alas, cola y lomo, con un collar amarillo claro. La cabeza y el cuello son también negros, y el pecho de un vivo marrón rojizo. Comúnmente se le ha dado a este pájaro el nombre de viudo, a causa de su color oscuro y larga cola, y también por su manifiesto desconsuelo cuando se le caen las bellas plumas de la cola tras la época de apareamiento. El ave del paraíso mide, sin contar el largo plumaje de la cola, entre doce y quince centímetros.»

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Debate: ¿Armonía o conflicto entre libre comercio y ambiente?

Reconciliar el crecimiento económico con la protección del ambiente es uno de los grandes retos que tienen ante sí los gobernantes. Por desgracia, estos objetivos inseparables suelen considerarse antitéticos: las medidas adoptadas para fomentar uno parecen encaminadas a perjudicar al otro. En las páginas siguientes, dos economistas debaten si la existencia de un comercio internacional sin restricciones, como el contemplado en las propuestas del GATT (Acuerdo Internacional sobre Comercio y Aranceles), va a dañar o a proteger nuestro entorno. Jagdish Bhagwati sostiene que la liberación del comercio de ataduras innecesarias supone la vía óptima para cuidar el medio, a la vez que se salvaguarda la prosperidad y la libertad. En el bando opuesto milita Herman E. Daly, para quien el libre comercio, dejado a su aire, supondrá una agresión contra el ambiente y el bienestar humano.

En defensa del libre comercio

Los ecologistas no tienen por qué temer los efectos del libre comercio. Ambas causas pueden defenderse mediante soluciones imaginativas

Jagdish Bhagwati

Los economistas saben reconciliar los enfrentamientos entre absolutos; para ello inventaron la idea de compensación. No debieran, pues, sorprenderse de que la deseada protección ambiental choque a veces con la búsqueda del máximo beneficio en el comercio; tienen que recelar de las declaraciones tranquilizadoras de ciertos políticos, que hablan del mutuo beneficio intrínseco de ambas causas. Pero están desconcertados ante la pasión y la ferocidad, ante la carencia frecuente de lógica y pruebas que los grupos ecologistas evidencian en sus ataques recientes al libre comercio y al Acuerdo Internacional sobre Comercio y Aranceles (GATT), la institución que vela por el sistema de comercio mundial.

La animosidad de los ecologistas contra el comercio tal vez sea inevitable. El comercio ha sido fundamental para el pensamiento económico desde que Adam Smith descubrió las virtudes de la especialización y de los mercados que la sostienen de forma natural. Al no existir mercados espontáneos que persigan la protección del ambiente, deben ser creados de intento. Por tanto, el comercio sugiere que los gobiernos se abstengan de intervenir, mientras que el ecologismo considera necesaria esta intervención. Además, el mercado es explotado, y sus virtudes alabadas, por los intereses empresariales y multinacionales, mientras que los objetivos ambientales suelen ser adoptados por organizaciones sin ánimo de lucro, que, en general, desconfían de aquellos intereses. El comercio es práctica antiquísima, de cuyo fomento se ocupan instituciones consolidadas durante muchos años de experiencia y reflexión. La protección del ambiente, por contra, es un afán reciente de instituciones nacionales e internacionales embrionarias, sin cristalizar.

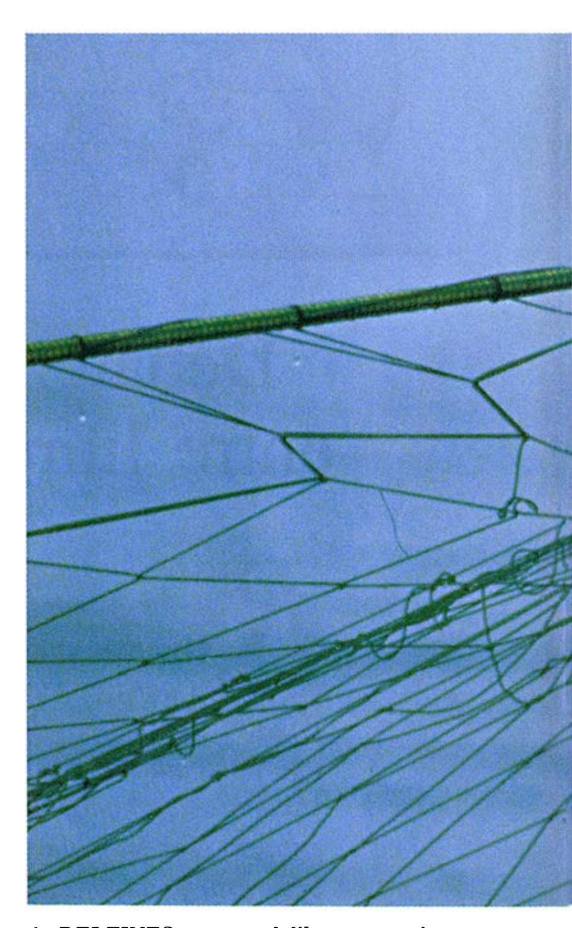
JAGDISH BHAGWATI regenta la cátedra Arthur Lehman de economía y ciencia política en la Universidad de Columbia. También fue profesor "Ford International" de economía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Asesor de política económica del director general del GATT, ha publicado, entre otros libros, *Proteccionism* y *The World Trading System and Risk*.

En 1992 la hostilidad ambientalista contra el comercio se exasperó cuando el Grupo de resolución de contenciosos del GATT, imparcial, decidió a favor de México y el libre comercio, en contra de EE.UU. y del bienestar de los delfines. EE.UU. había puesto un embargo a las importaciones de atún mexicano alegando que éste se había pescado con redes barrederas, que causan una muerte cruel a los delfines, y en cantidades mayores de lo que la ley estadounidense permite. El grupo del GATT decidió, en efecto, que EE.UU. no podía suspender los derechos comerciales de México proscribiendo unilateralmente los métodos utilizados por este país para la pesca del atún.

Esta decisión espoleó las consecutivas campañas conservacionistas contra el libre comercio y el GATT. A este tratado no le faltan detractores, desde luego. Algunos de sus recientes críticos temen su ineficacia y lo han declarado "muerto". Pero los ataques de los ecologistas, que por el contrario presuponen la omnipotencia del GATT, siguen siendo algo muy distinto.

El anuncio publicado en el *New York Times* el 20 de abril de 1992 por una coalición de grupos protectores del ambiente marca un nuevo nivel de propaganda alarmista, indigna incluso, calculada para apelar más al instinto que a la razón. Habla de "los burócratas sin cara del GATT" que han organizado "un ataque por sorpresa contra la democracia". Esta velada referencia a Pearl Harbor deja asomar una táctica común en la controversia comercial: golpear a Japón. Las indirectas son constantes y patentes en las interminables batallas entabladas en el Congreso sobre los acuerdos ambientales suplementarios para el Acuerdo Norteamericano de Libre Comercio (NAFTA). La hostilidad también se cuela en la conclusión de las negociaciones de la Ronda Uruguay del GATT, ahora en su séptimo año, en la que los ecologistas se oponen al establecimiento de la nueva Organización Multilateral de Comercio, pensada para imponer al GATT una disciplina eficaz y dotarle de la necesaria estructura institucional.

Resulta trágico que los defensores de las dos grandes causas de los años noventa, el comercio y el ambiente, anden a la greña. Pero se trata de un conflicto artificial, en buena medida. Se dan, ciertamente, algunas diferencias de principio entre ambos que no admiten componendas: para determinados ecologistas, la naturaleza es un coto autónomo, en tanto



1. DELFINES contra el libre comercio. La ley estadounidense prohíbe los métodos de pesca cuyo resultado es la muerte de delfines como éste, atrapado en su cos-

que la mayoría de los economistas opina que está al servicio de la humanidad. Pero en la inmensa mayoría de los casos las discrepancias arrancan de malentendidos. Es necesario desenmascarar las falacias más notorias, para desestimarlas, antes de abordar los auténticos problemas.

Entre los ecologistas se ha extendido el temor de que el libre comercio vaya a aumentar el crecimiento económico y que éste deteriore el ambiente. Este temor carece de sentido: el crecimiento permite a los gobiernos recaudar impuestos y aumentar los recursos destinados a diversos fines, entre ellos la moderación de la contaminación y la protección general del medio. Sin dichos ingresos, poco puede hacerse, por muy puros que sean los motivos.

¿Cómo gastan las sociedades estos ingresos extra? Depende de cómo influya la riqueza en el deseo de un ambiente mejor. En los países ricos hay más grupos preocupados por las causas ambientales que en los pobres. Las políticas eficientes, como la de liberar el comercio, en términos generales deberían ayudar a proteger el entorno, no a degradarlo.

Ahora bien, si queremos predecir el efecto que tendrá el crecimiento sobre el ambiente, debemos considerar su parte en la generación de contaminación. El crecimiento afecta no sólo a la demanda de un ambiente mejor, sino también a la ración de contaminación asociada al crecimiento. El efecto neto sobre el ambiente dependerá, por consiguiente, del tipo de crecimiento económico. Gene M. Grossman y Alan B. Krueger, de la Universidad de Princeton, observaron que la contaminación urbana por emisiones de dióxido de azufre disminuye a medida que aumenta la renta per cápita. La única excepción la constituyen los países cuyos ingresos per cápita son inferiores a 5000 dólares. Resumiendo, los ecologistas están en un error cuando temen que el efecto necesario del comercio, a través del crecimiento, va a ser el incremento de la contaminación.

Además de los atribuibles al aumento de los ingresos, los efectos económicos ayudan también a proteger el ambiente. Por ejemplo, un comercio más libre permite importar a cualquier lugar la tecnología disponible para luchar contra la contaminación. O sustituir el consumo de un carbón local rico en azufre por otro con bajo contenido en este elemento.

El libre comercio también puede llevar a mejoras ambientales como consecuencia de un cambio en la composición de la producción. Robert C. Feenstra, de la Universidad de California en Davis, ha demostrado que la imposición de restricciones a la importación de automóviles japoneses a EE.UU., durante los años ochenta, indujo un cambio en la composición de las exportaciones, de coches pequeños a coches grandes, con la idea de aumentar sus ingresos sin elevar el número de unidades vendidas. Pero los coches grandes sacan menos rendimiento del combustible empleado. Por tanto, las medidas proteccionistas norteamericanas no redujeron la contaminación media producida por los coches importados, sino que resultaron en un incremento real de la misma.

Tales objeciones equivocadas contra el libre comercio pueden rebatirse sin gran esfuerzo (aunque no son tan fáciles de eliminar del discurso político), pero hay verdaderos conflictos entre el comercio y el ambiente. Para entenderlos y resolverlos, los economistas distinguen entre dos clases de problemas ambientales: los intrínsecamente internos y los intrínsecamente internacionales.

Que Brasil contamine un lago que no escapa de sus fronteras es un problema intrínsecamente interno. Pero si lo hace en un río que luego recorre Argentina, el problema adoptará un carácter intrínsecamente internacional. Tal vez los ejemplos más importantes de contaminación internacional sean los de la lluvia ácida —precipitación en un país de las emisiones de dióxido de azufre producidas por otro— y los gases responsables del efecto de invernadero, así el dióxido de carbono, que contribuyen al calentamiento global, desde dondequiera que se emitan.

¿Por qué los problemas ambientales intrínsecamente nacionales crean preocupación internacional? La razón principal yace en el convencimiento de que la diversidad de normas ambientales afecta a la competitividad. Las empresas y los sindicatos temen que sus rivales de otros países gocen de ventaja si sus gobiernos imponen normas de protección ambiental menos estrictas, lo que, según ellos, sería injusto. Para jugar en las mismas condiciones, estos lobbies insisten en que los países extranjeros eleven sus normas hasta los niveles nacionales.



ta atlántica. Pero cuando los Estados Unidos intentaron extender esa normativa a México, a través del embargo de la importación de atunes procedentes de este país, un tribunal internacional rechazó semejante medida política por constituir una limitación ilegal al comercio internacional.

A su vez, los grupos ecologistas temen que, si esta "armonización ascendente" no se emprende antes de liberar el comercio, la presión de las empresas locales no competitivas obligue a rebajar las normas ambientales internas, con lo que se perderían las conquistas tan duramente conseguidas. Existe otro temor, además: que las empresas se trasladen a los países con una regulación ambiental más relajada.

Pero si la cuestión de la competitividad convierte en aliados a ecologistas, empresarios y sindicatos, los primeros tienen sus propias opiniones sobre otros aspectos. Se distinguen dos áreas problemáticas. Por un lado, algunos defensores del ambiente intentan imponer sus propias escalas de valor sobre las de los demás, recurriendo a las sanciones comerciales para inducir, u obligar, a aceptarlas. Por ejemplo, grupos ecologistas de EE.UU. se oponen a la pesca del atún con redes barrederas, que matan a los delfines; por consiguiente, favorecen las restricciones a la importación del atún así pescado de México y otros países. Por otro lado, ciertos grupos temen que las leyes de comercio libre, como las incorporadas en el GATT y reforzadas en la Ronda Uruguay, limiten su libertad para perseguir los objetivos ambientales puramente nacionales, al proscribir los tribunales del GATT la regulación debatida.

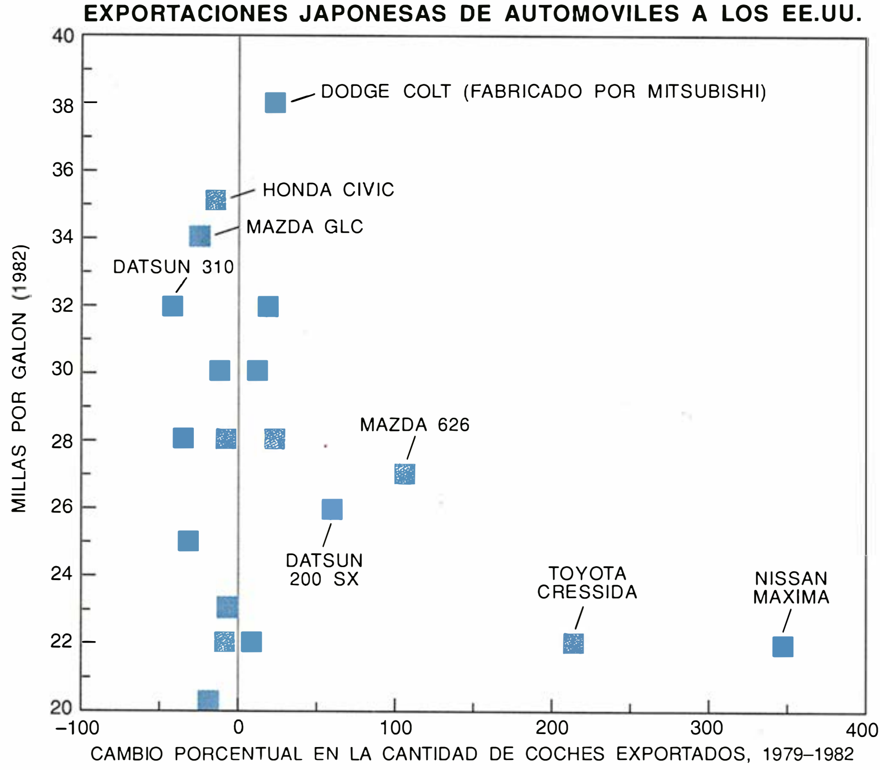
Los ecologistas tienen motivos para preocuparse, pero no todos los afanes son legítimos, ni todas las soluciones propuestas a los que lo son parecen sensatas. Así, la inquietud suscitada por la competitividad ha llevado a plantear la demanda ilegítima de considerar atentatorias (por "dumping social") la normas ambientales del extranjero: los países culpables estarían proporcionando subvenciones injustas a sus exportadores mediante reglamentos ambientales poco restrictivos. Esos subsidios implícitos, continúa el razonamiento, deben ser compensados con aranceles a la importación.

Pero las diferencias internacionales, en lo concerniente a la legislación ambiental, son perfectamente naturales. Aun cuando dos países compartieran los mismos objetivos ambientales, las contaminaciones *específicas* que tendrían que combatir y, por ende, las industrias que habrían de regular, no serían idénticas. Sin ir más lejos, en México hay un incentivo social mayor que en EE.UU. para emplear el dinero en prevenir la disentería que en reducir el plomo de la gasolina.

Igualmente, un bien ambiental concreto puede ser más valorado por un país pobre que por otro rico. Compárese, por ejemplo, el valor asignado a un lago con el coste de limpiar las aguas residuales vertidas en él por una compañía farmacéutica. En la India es posible que el agua de este lago la beba una población desnutrida, cuya mortalidad aumentaría notablemente con la contaminación. En EE.UU., poca gente consumiría esta agua, y los que lo hicieran podrían protegerse mediante la adquisición privada de filtros. En este ejemplo, la India sería probablemente el país que preferiría el agua limpia a los beneficios de la compañía farmacéutica.

Las consecuencias derivadas de las diferentes normativas son claras: cada país tendrá menor cantidad de las industrias cuya contaminación más tema. De hecho, aunque no hubiera comercio internacional, reduciríamos las industrias cuya contaminación quisiéramos evitar, lo que ocurriría al aplicar la política de imponer sanciones a los contaminadores de cualquier tipo por el daño que ocasionan. Reprobar entonces los efectos que nuestra evaluación negativa de la contaminación tiene sobre una industria dada es caer en la contradicción: nos estaríamos negando a enfrentarnos a las consecuencias de nuestra tabla de opciones ambientales.

En Estados Unidos y en otros países se siente la necesidad de dictar leyes contra el dumping social. David L. Bore, senador de Oklahoma, que propuso la Ley de disuasión de la contaminación internacional en 1991, exigía aranceles a la importación porque, según sus propias palabras, "algunas industrias estadounidenses, como la del carbón y la del acero, gastan hasta un 250 por ciento más con respecto al producto interior bruto en controles ambientales que otros países... Cuando miro muchas empresas importantes para mi estado, veo la injusta ventaja que disfrutan otras naciones que explotan el ambiente y la salud pública para conseguir beneficios". Al Gore, vicepresidente de la nación, escribió en *Earth in the Balance: Ecology and the Human Spirit:* "Igual que, según las leyes del comercio, a veces se consideran injustas las subvenciones gubernamentales a una industria concreta, la aplicación blanda e ineficaz de las medidas de control de la contaminación debería



2. CONSECUENCIAS DAÑINAS PARA EL ENTORNO que podrían derivar de las limitaciones impuestas al comercio. La figura ilustra la evolución seguida por la exportación japonesa de coches a los Estados Unidos, antes y después de que Japón autolimitara el volumen de expedición. Bajaron las ventas de coches pequeños y ahorradores de combustible, en tanto que se dispararon las de prototipos grandes y derrochadores. (Una milla por galón equivale a 0,43 kilómetros por litro.)



3. EL EMPLEO que genera el sector pesquero del atún en México compensa la vida de los delfines que se salvarían de abandonarse la pesca con redes barrederas. No deben importarse a ningún país nuestros criterios axiológicos.

incluirse también en la definición de prácticas comerciales desleales."

Estas exigencias revelan una falta de lógica económica, además de ignorar la realidad política. Recuérdese que la llamada subvención a los productores extranjeros mediante la aplicación de normas ambientales poco restrictivas es sólo un subsidio implícito, que no se materializa. Según Boren, el subsidio se calcularía como "el coste en el que incurrirían los fabricantes o los productores de artículos extranjeros para cumplir las normas ambientales impuestas a los productores estadounidenses del mismo tipo de mercancías". Pero cualquier persona que conozca cómo se hacen los cálculos de dumping, sabe que la estadounidense Oficina de Protección Ambiental puede proponer cualquier estimación que se le antoje. El cinismo político dictará inevitablemente los cálculos.

Además, hay buenas razones políticas para aquietar la preocupación de los ecologistas con respecto al traslado de las industrias a países con normas ambientales menos rigurosas. Los gobiernos de los países con un reglamento más estricto podrían hacerlo sin obstaculizar el libre comercio insistiendo en que sus empresas cumplan la normativa del país de origen cuando salgan al extranjero; esa política cabe enteramente en la jurisdicción de un país con una normativa ambiental exigente. Sin olvidar cuán improbable sería que los gobiernos de los países destinatarios se opusieran a semejante acto de buena ciudadanía mostrado por los inversores extranjeros.

Hay todavía otra razón que impulsa a los ecologistas a oponerse al comercio libre: desean intervenir en la política comercial para imponer sus propios valores a otras comunidades y países. Muchos conservacionistas quieren suspender los derechos mercantiles de países que autorizan el uso de redes barrederas en la pesca del atún y de trampas que inmovilizan las patas en la caza de animales. Dicho castigo parece, sin embargo, un uso inadecuado del poder del estado. Los valores en cuestión no son aceptados de forma generalizada, como los derechos humanos, sino que son subjetivos; es sorprendente que los que se oponen a las redes barrederas antepongan los intereses de los delfines a los del pueblo mexicano, que podría prosperar mediante una pesca más productiva.

Además, una vez introducidos dichos valores en el comercio libre, se deja expedito el camino a una sucesión interminable de exigencias. Los ecologistas están a favor de los delfines, y los hindúes tienen sus vacas sagradas. Los activistas de los derechos de los animales, que no hacen distingos entre las especies, se opondrán a nuestros mataderos.

La militancia moral de los ecologistas del mundo industrializado ha empezado a desilusionar a sus homólogos más próximos de los países no desarrollados, quienes acusan a los países ricos de "imperialismo ecológico" y niegan que las naciones occidentales tengan el monopolio de la virtud. La revista ecologista más radical de la actualidad en India, *Down to Earth*, publicaba en un reciente editorial: "En la realidad de nuestro mundo, los países del norte usan el comercio exclusivamente como un instrumento para disciplinar a las naciones ambientalmente descarriadas. Obviamente, si la India o Kenya amenazaran con interrumpir el

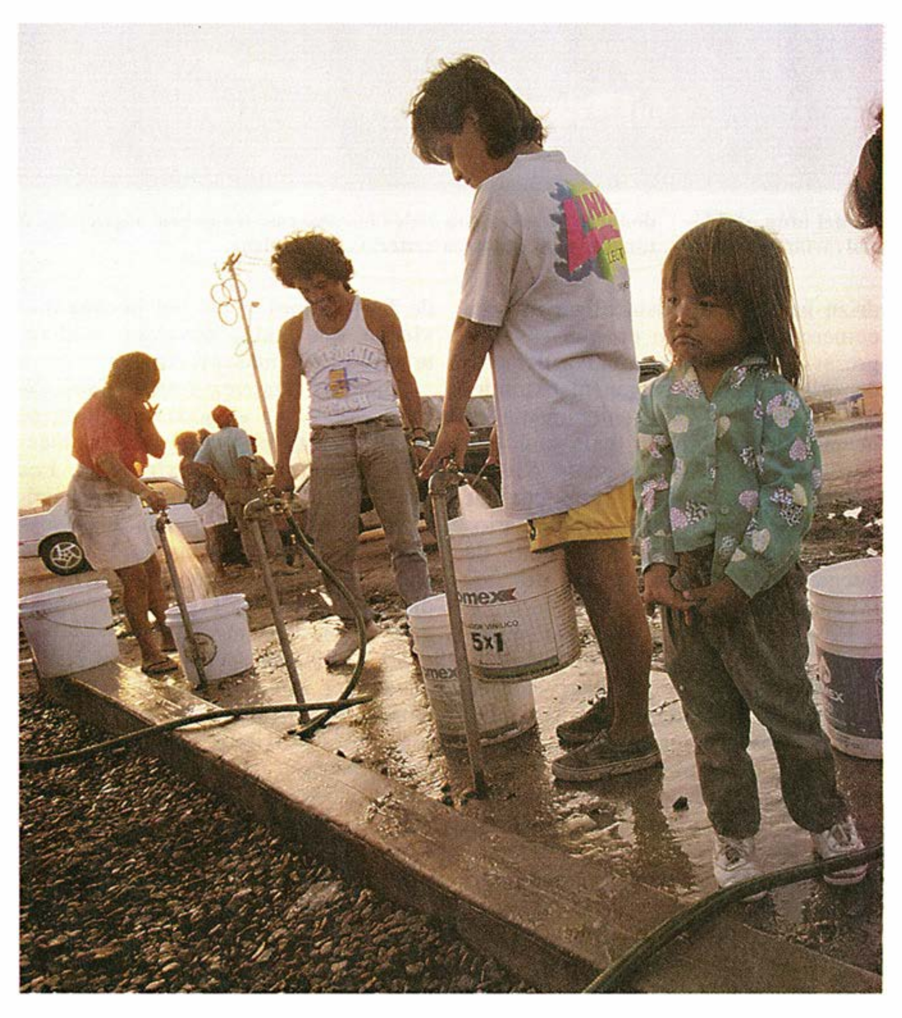
comercio con Estados Unidos, apenas les afectaría. Pero la verdad es que son los países del norte los que producen el mayor impacto [negativo] sobre el ambiente mundial."

Si fueran muchos los países que se prestaran a este juego, las suspensiones repetidas de los derechos a comerciar empezarían a socavar la imparcialidad del sistema comercial, así como la estabilidad de los mercados internacionales y la posibilidad de pronosticar su evolución. Algunos ecologistas sostienen que los países deberían ser libres de supervisar los métodos de producción de sus socios comerciales. Ignoran la consecuencia indudable de esa línea política: se abriría la caja de Pandora del proteccionismo. Raro es que los métodos de producción de una industria sean idénticos en distintos países.

Hay mejores maneras de complacer la propensión de los ecologistas a exportar sus preferencias éticas. Por ejemplo, las organizaciones estadounidenses de este tipo pueden presionar para que el gobierno mexicano adopte sus puntos de vista. También pueden organizarse boicoteos privados; éstos pueden tener mucha influencia en los países ricos con mercados grandes, de los que a menudo dependen los países pobres, el verdadero objetivo. La frecuente, y enormemente cara, publicidad emitida por los grupos ecologistas contra el GATT demuestra que sus recursos sobrepasan en mucho los de los países con dificultades económicas cuyas políticas rechazan.

El análisis coste-beneficio lleva a concluir que la suspensión gubernamental unilateral de los derechos comerciales de los demás no es la manera adecuada de fomentar nuestro propio criterio de valores. Por otro lado, tales sanciones pueden ser multilateramente invocadas con toda justicia para defender valores morales por todos admitidos. En estos casos —como durante la censura del apartheid, practicada hasta hace poco en Sudáfrica— es posible garantizar el acuerdo generalizado para la aplicación de sanciones. Con la gran mayoría convertida a la causa, puede esgrimirse el procedimiento de renuncia del GATT para suspender los derechos comerciales del país culpable.

Los ecologistas están preocupados también por los obstáculos que las reglas del GATT, actuales y previstas, plantean a la reglamentación ambiental, completamente orientada a la producción y el consumo internos. En principio, el GATT deja que un país miembro aplique toda reglamentación que no atente contra los proveedores extranjeros, o entre ellos. Por ejemplo, puede exigirse la incorporación de sacos inflables en los automóviles, siempre que la norma se aplique a todos los fabricantes. El GATT permite incluso reglas que discriminan en perjuicio del comercio por razones de seguridad y salud.

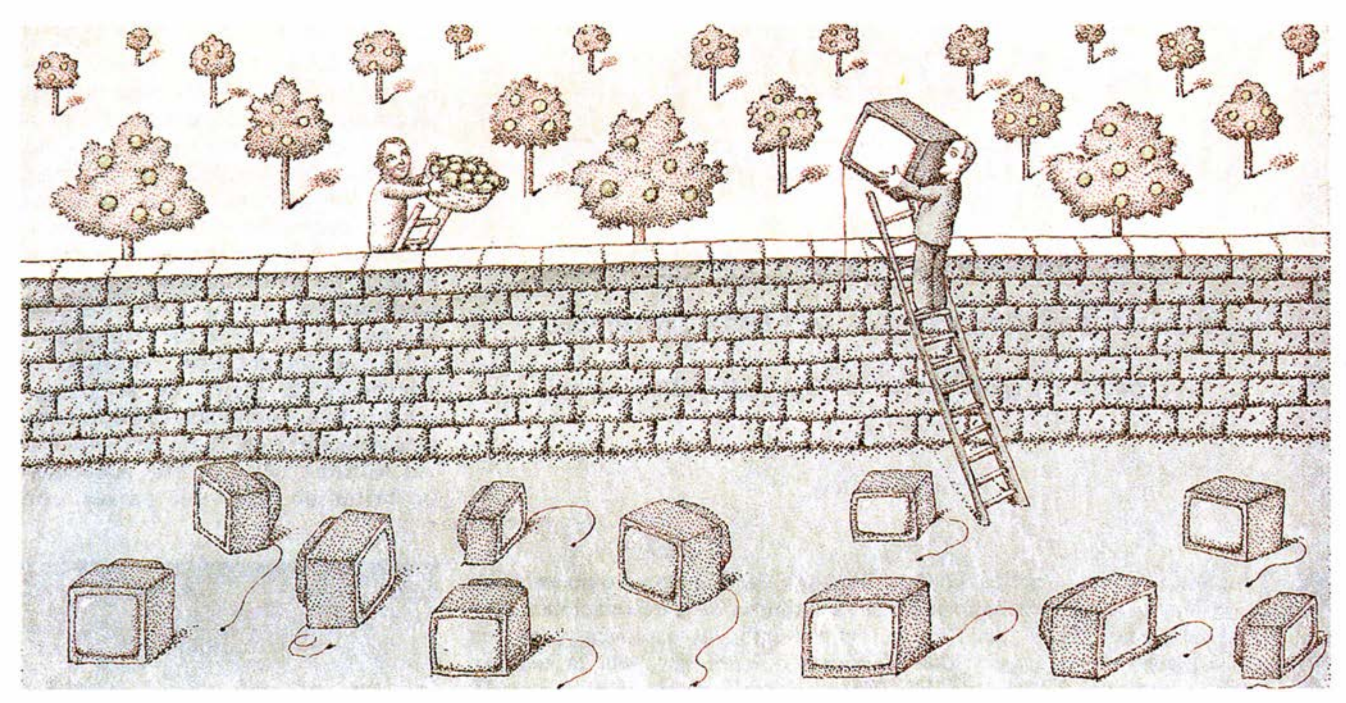


4. EL AGUA POTABLE es vital para los aldeanos mexicanos, que hacen cola para abastecerse y evitar el riesgo de contraer el cólera que les amenaza en otras fuentes locales. El valor relativo de los beneficios ambientales varía de unos países a otros. México fomenta mejor la salud pública concentrando sus recursos en la depuración del agua que en reducir el plomo de la gasolina.

El GATT reconoce, sin embargo, tres vías por las que las normativas podrían traducirse en restricciones gratuitas del comercio, y levanta ampollas entre los ecologistas al dictaminar los procedimientos para evitarlo. En primer lugar, la verdadera intención, y efecto, de un reglamento podría ser la protección no del ambiente, sino de una industria local; en segundo lugar, es posible que un país imponga más restricciones de las necesarias para conseguir su objetivo ambiental declarado; en tercer lugar, puede que un país establezca normas carentes de base científica.

La cuestión de las intenciones queda bien ilustrada por la "guerra de la cerveza" entablada entre Ontario y Estados Unidos. Hace cinco años, la provincia canadiense gravó con un impuesto de diez centavos por lata de cerveza, con el propósito manifiesto de reducir la basura. Estados Unidos objetó que la intención última era discriminar a sus cerveceros, que la envasan en latón, mientras que las empresas canadienses utilizan botellas; a mayor abundamiento, Ontario no gravaba fiscalmente el uso de latas para zumos y sopas, lo que hubiera incidido negativamente en los industriales nacionales.

El segundo problema reviste, por lo común, mayor dificultad, pues es imposible encontrar restricciones alternativas que consigan exactamente los mismos resultados ambientales que la política original a menor coste. La sección adjudicadora del GATT se ve forzada entonces a evaluar, implícita o explícitamente, las compensaciones entre el coste produ-



5. LOS BENEFICIOS DEL COMERCIO provienen del ahorro conseguido cuando los países se especializan en actividades que les procuran una ventaja. Esta especialización avanzará con paso firme si todos confían en la estabilidad del régimen comercial.

cido por desarticulación comercial y el coste derivado de no cumplir el objetivo ambiental. Es probable, por tanto, que los ecologistas y los economistas de mercado discrepen en cuanto a la importancia que la sección (o panel) debería asignar a esos intereses divergentes.

Los ecologistas se muestran reticentes a recurrir a pruebas científicas para determinar si puede prohibirse el comercio de un producto. La necesidad de demostrar el propio punto de vista constituye siempre una carga molesta para quienes tienen el poder político de emprender una acción unilateral. Sin embargo, los expertos comerciales salen airosos del debate. Imaginemos que los agricultores estadounidenses fumigaran las manzanas con el plaguicida Alar, y no lo hicieran los campesinos europeos; supongamos, además, que los consumidores europeos iniciaran una campaña contra la alegada toxicidad del plaguicida. ¿Podría la Comunidad Europea prohibir la importación de manzanas estadounidenses sin realizar *alguna* prueba científica de su peligro para la salud? Cierto es que hasta la ciencia más rigurosa no lo es a veces en grado suficiente, y estudios distintos pueden llegar a conclusiones diferentes. Pero sin la referencia equilibradora de la ciencia, la tentación de dar rienda suelta a los propios temores, y de jugar con los de otros, sería irresistible.

En todos los casos, los ecologistas moderados querrían que el GATT adoptara procedimientos más transparentes para la resolución de los litigios. Y desean mayor respaldo jurídico para presentar alegaciones cuando se trate de legislar sobre cuestiones ambientales. Estos objetivos parecen razonables y factibles.

No todos los problemas ambientales se restringen a un ámbito local. Los hay de escala global, como el efecto de invernadero y la merma de ozono estratosférico. Estos plantean, a su vez, cuestiones que precisan soluciones cooperativas y multilaterales, además de eficaces y equitativas. Ahora bien, es fácil ver que los países ricos podrían usar su poder económico para conseguir protocolos que aumenten al máximo el rendimiento a expensas de los países más pobres.

Imaginemos, a este propósito, que los redactores de un protocolo solicitaran de Brasil que cesara en su tala de la pluviselva, y dejaran que los países industrializados continuaran emitiendo dióxido de carbono; podrían aducir la razón siguiente: a Brasil le cuesta menos conservar un árbol (que absorbe una unidad de dióxido de carbono al año) de lo que le costaría a Estados Unidos o Alemania ahorrar una unidad consumiendo menos combustible. Esa contrapartida, aunque rentable en términos económicos, sería una solución del todo injusta si se pretendiera, además, que Brasil, el más pobre, pagara la factura.

Antes de que un grupo de países pueda imponer sanciones comerciales a otro que no se ha adherido a un acuerdo multilateral, importa averiguar si se trata de un acuerdo justo. Los países no firmantes que fueran objeto de sanciones comerciales deberían tener derecho a expresar sus objeciones ante un foro imparcial, exigiendo que los fuertes expliquen sus medidas, aun cuando parezcan irreprochables.

No cabe duda de que la persecución simultánea de las dos causas, el comercio libre y la protección ambiental, está sembrada de dificultades. Pero ninguna es invencible si se pone buena voluntad y se aportan innovaciones institucionales imaginativas. La aversión al comercio libre y a los tratados regionales de la que hacen gala muchos ecologistas es infundada y va siendo hora de que abdiquen de ella. Sería mejor que dedicaran su pasión moral y vigor intelectual a construir puentes entre las causas del comercio y del ambiente.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENVIRONMENTAL IMPACTS OF A NORTH AMERICAN FREE TRADE AGREEMENT. Gene M. Grossman y Alan B. Krueger en *The Mexico U.S. Free Trade Agreement*, dirigido por Peter M. Garber, MIT Press, 1993.

TRADE AND ENVIRONMENT: DOES ENVIRONMENTAL DIVERSITY DETRACT FROM THE CASE FOR FREE TRADE? Jagdish Bhagwati y T. N. Srinivasan, Mimeograh, Yale University, 1993.

Los peligros del libre comercio

Los economistas tienen por costumbre ignorar los costes ocultos del libre comercio para el ambiente y la sociedad

Herman E. Daly

Ninguna doctrina política goza de mayor aceptación entre los economistas que la del libre comercio basado en la especialización internacional en función de la ventaja comparativa que reporta. Durante mucho tiempo, el libre comercio se supuso bueno mientras no se demostrase lo contrario. Ese supuesto constituye la piedra angular del Acuerdo General sobre Comercio y Aranceles (GATT) y del propuesto Acuerdo Norteamericano de Libre Comercio (NAFTA). Las bases de negociación en la Ronda Uruguay fortalecen el compromiso del GATT con el libre comercio y la mundialización de la economía.

Pero habría que invertir esta premisa, y optar por favorecer la producción nacional para mercados domésticos. Se acudiría al comercio internacional equilibrado cuando fuera oportuno, sin permitirle nunca entrometerse en los asuntos de un país ante el riesgo de que provoque un desastre ambiental y social. La economía nacional debería representar el perro y el comercio internacional su rabo. Sin embargo, el GATT pretende atar los rabos de todos los perros con tal fuerza que sería el nudo internacional el que dirigiría el movimiento de cada perro nacional.

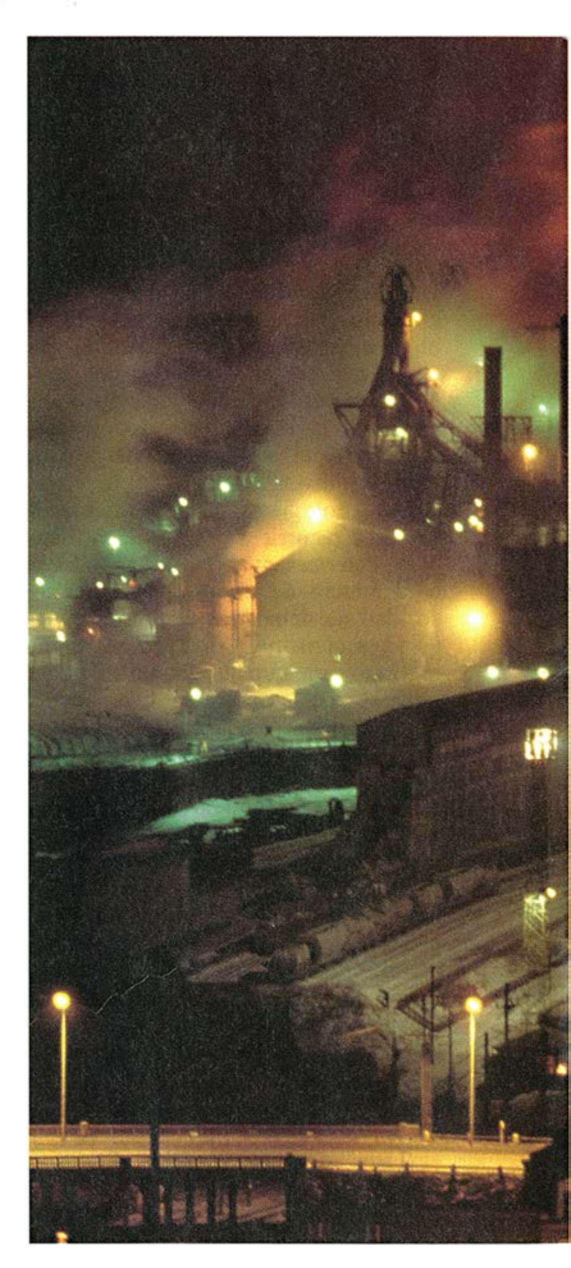
La dirección más prudente está en las palabras, hoy olvidadas, de John Maynard Keynes: "Van, pues, mis simpatías hacia quienes quieren reducir al mínimo las interrelaciones económicas entre las naciones, y no con quienes quieren liar más la madeja. Ideas, conocimiento, arte, hospitalidad, viajes, deben ser, por su propia esencia, internacionales. Pero dejemos que los artículos sean de producción nacional siempre que sea razonable y conveniente; sobre todo, que las finanzas sean fundamentalmente nacionales." Alejados de Keynes, los defensores de las modificaciones del GATT propuestas en la Ronda Uruguay no sólo quieren quitar importancia a la "producción interna", sino que también pretenden que las finanzas y todos los demás servicios sean predominantemente internacionales.

Suele trazarse una línea divisoria entre el bando de los economistas y el de los ecologistas; aquéllos estarían a favor del libre comercio; éstos, en contra. Pero esa polarización desvirtúa el debate. La controversia real se plantea en torno a qué tipo de regulaciones se va a establecer y qué objetivos son legítimos. Los abogados del libre comercio buscan el máximo de beneficios y de producción sin mirar los costes sociales y ambientales ocultos. Aducen que, cuando el crecimiento económico haya generado suficiente riqueza, se dispondrá de los fondos para limpiar el daño producido por el crecimiento. A la inversa, los ecologistas y algunos economistas (yo entre ellos) sospechan que el crecimiento aumenta el coste ambiental a un ritmo más acelerado que el de los beneficios derivados de la producción, lo que nos hace más pobres, no más ricos.

Más que hablar de "libre comercio" —¿quién puede oponerse a algo tan persuasivo como la libertad?— debiéramos hablar, en aras de la precisión, de "comercio internacional sin ataduras reglamentarias". Pero la ausencia de reglas no es siempre buena política. De mi docencia universitaria de la doctrina del libre comercio me queda cierta simpatía por su enfoque. Me preocupa, sin embargo, ahora que nuestra profesión se ha dejado encandilar por resultados lógicamente bellos e ignora las políticas basadas en datos objetivos; los economistas nos hemos vuelto peligrosos para la Tierra y sus habitantes.

La defensa del libre comercio se asienta en la lógica de la ventaja comparativa, formulada explícitamente a principios del siglo XIX por David Ricardo. Observó este economista británico que los países con

HERMAN E. DALY es economista del departamento ambiental del Banco Mundial en Washington, desde 1988. Antes había enseñado economía en la Universidad estatal de Louisiana. Cofundador y editor adjunto de *Ecological Economics*, ha escrito varios libros, entre ellos *Steady-State Economics*. El punto de vista expresado aquí por Herman Daly no debe atribuirse al Banco Mundial.

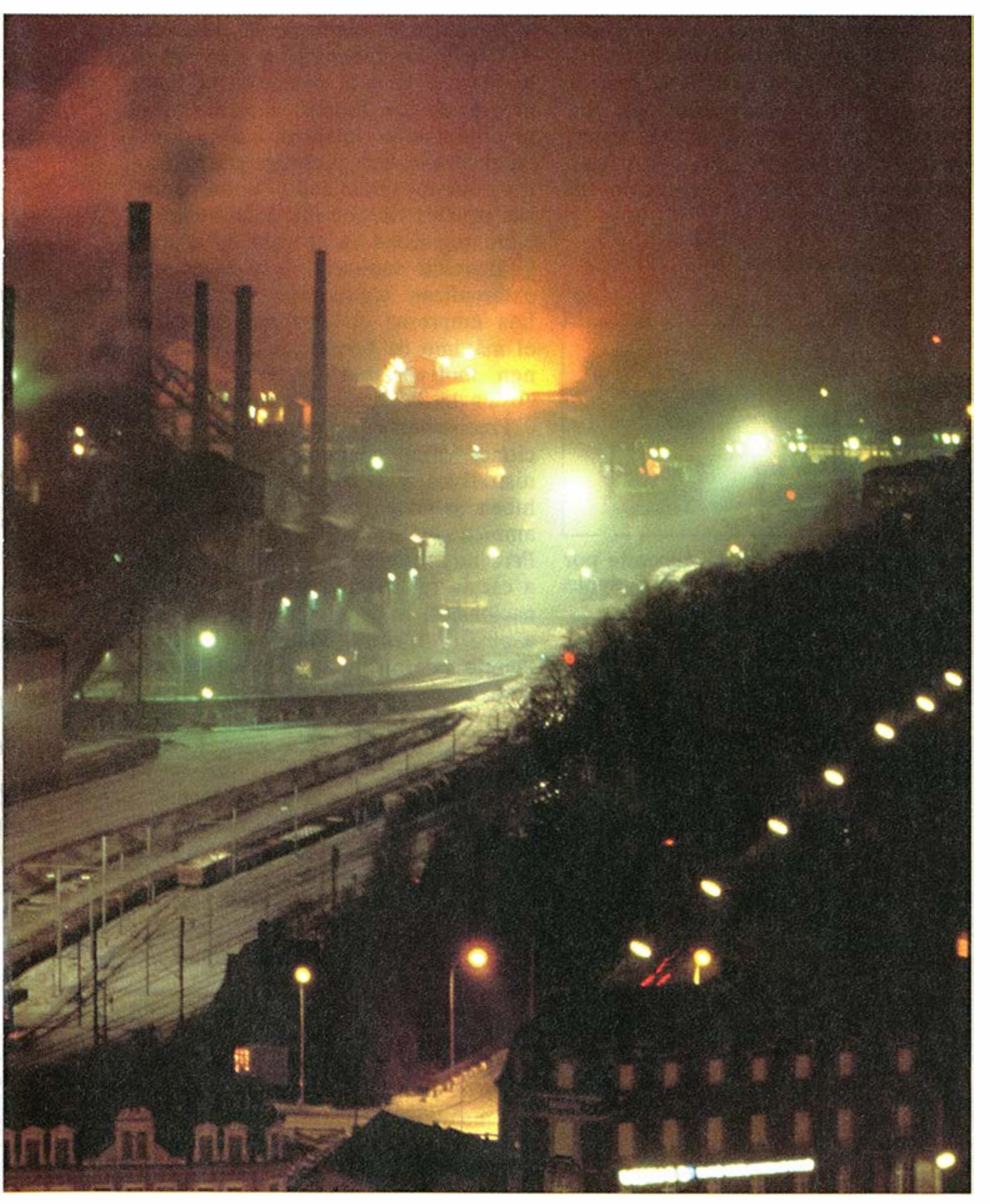


1. A TRAVES de la contaminación las industrias "externalizan" costes asociados a la producción. A las empresas les resulta rentable fabricar sus artículos en países con

técnicas, hábitos y recursos diferentes divergían también en el coste resultante de la fabricación de los mismos productos. A un país podía resultarle más barato, en términos comparativos, extraer carbón que plantar trigo, y a otro sucederle lo contrario. Si las naciones se especializaban en los productos que les reportaban una ventaja comparativa y comerciaban libremente para obtener otros, todas saldrían beneficiadas.

El problema no es tanto la coherencia lógica del razonamiento, cuanto la premisa esencial de la que partió Ricardo, a menudo olvidada: los factores de producción (en especial el capital) son internacionalmente inmóviles. En el mundo actual, donde se pueden transferir miles de millones de dólares entre naciones a la velocidad de la luz, no se satisface esta condición esencial. Además, los defensores del libre comercio animan las inversiones extranjeras como una estrategia de desarrollo. En resumen, los partidarios del libre comercio emplean una argumentación fundada en la impermeabilidad de las fronteras nacionales al capital para apoyar una política que se propone abrir esas barreras al paso cada vez más fluido de capital y mercancías.

Este hecho por sí solo invalida la presunción de que el comercio internacional beneficiará necesariamente a todos los socios. Además, para que el comercio resulte ventajoso para ambas partes, las ganancias no deben venir mermadas por cargas superiores. Ahora bien, una vez especializadas, las naciones dejan de ser libres para *no* comerciar, pérdida de independencia que puede convertirse en un gravamen. Pensemos también que el transporte internacional de las mercancías no debe anular los beneficios; la inversión energética en transporte es altísima. Hoy, el coste de la energía suele estar subvencionado por los gobiernos a través de la desgravación fiscal, la ayuda estatal a la investigación y las partidas destinadas al ejército que garantizan el acceso al petróleo. Los costes ambientales derivados de la quema de combustibles fósiles tampoco repercuten en el precio de la gasolina. En la medida en que la energía esté subvencionada, también lo estará el comercio. El coste total de la energía, despojado de esos subsidios camuflados, reduciría las ganancias iniciales del comercio a larga distancia, ya sea internacional o interregional.



normas relativas a la contaminación, sanidad y trabajo muy laxas y venderlos después en otros sitios. Esta presión de la competencia puede inducir la relajación de normativas más severas. Los aranceles que eliminan estas injustas ventajas son esenciales para proteger la eficiencia global en la explotación de los recursos.

El libre comercio se resiente de otros factores que limitan su eficacia. Contra lo que cabría inferir de la ventaja comparativa, más de la mitad del comercio internacional se basa en la importación y la exportación simultánea de prácticamente los mismos bienes. Los norteamericanos importan galletas danesas y los daneses galletas norteamericanas. Con toda seguridad sería más rentable intercambiar las recetas, y se compaginaría mejor con la proclama keynesiana de que el conocimiento debe ser internacional y las mercancías nacionales.

A penas si se alude a otro corolario importante de la especialización; me refiero a la contracción de las opciones laborales. Uruguay tiene una clara ventaja comparativa en ganadería vacuna y lanar. Si se atuviera con rigor a las reglas de la especialización y el comercio, sólo debería ofrecer a sus ciudadanos una doble oportunidad, la de ser vaqueros o convertirse en pastores. Pero los uruguayos desean tener sus propios servicios legales, financieros, médicos, de seguros y educativos, además de la agricultura y la industria básicas: semejante diversidad supone cierta pérdida de eficiencia, pero es necesaria para el desarrollo de una conciencia de comunidad y nación.

Uruguay se enriquece teniendo una orquesta sinfónica propia, aunque fuera más rentable importar mejores conciertos sinfónicos a cambio de

lana, corderos, vacas y pieles. Hemos de considerar ganancia en bienestar el disponer de una amplia gama de posibilidades; no cabe la menor duda de que vaqueros y pastores uruguayos se enriquecen en sus relaciones con otros compatriotas dedicados a otras ocupaciones. En mi opinión, se ignora la dimensión comunitaria del bienestar en la argumentación simplista de que la especialización y el comercio deben ser buenos por el mero hecho de incrementar la disponibilidad per cápita de mercancías.

Supongamos incluso que sigue habiendo beneficios netos después de restar esas cargas de las ganancias brutas del comercio. Aquéllos deben compensar aún problemas más profundos y fundamentales. Los argumentos a favor del comercio libre tropiezan con los tres objetivos básicos de toda política económica: la *asignación* eficiente de los recursos, su justa *distribución* y el mantenimiento de una *escala* viable ("sostenible") de utilización de los recursos. Los dos primeros son objetivos tradicionales de la economía neoclásica. El tercero, de reciente configuración, se halla vinculado al enfoque ecológico, o de estado estacionario, de la economía; expresa que la entrada de materias primas y energía en una economía y la salida de residuos y calor han de estar dentro de las capacidades de regeneración y de absorción del ecosistema.

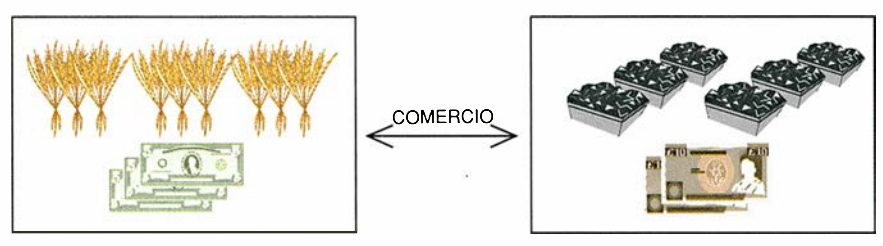
En la economía neoclásica, la asignación eficiente de los recursos depende de la contabilidad e internalización de todos los costes; decimos de éstos que están internalizados cuando los pagan directamente las entidades responsables de su existencia; tal es el caso, por ejemplo, del industrial que paga por el tratamiento de los residuos que su fábrica genera, y aumenta los precios para cubrir ese gasto adicional. Hablamos, por contra, de costes externalizados si son otros los que pagan; esto ocurre cuando la población sufre una enfermedad nueva, malos olores o molestias ocasionados por residuos sin reciclar. La base real de la eficiencia reside en la contabilización de todos los costes.

Los economistas aciertan en su insistencia en que las naciones sigan programas nacionales de internalización de los costes en los precios. Pero también, y esta vez yerran, invitan a comerciar libremente con otros países que no internalizan sus costes (y que, en consecuencia, tienen precios más bajos). Si un país intenta acometer ambas políticas a la vez, el conflicto es obvio: la competencia libre entre países con diferentes formas de internalizar los costes resulta totalmente injusta.

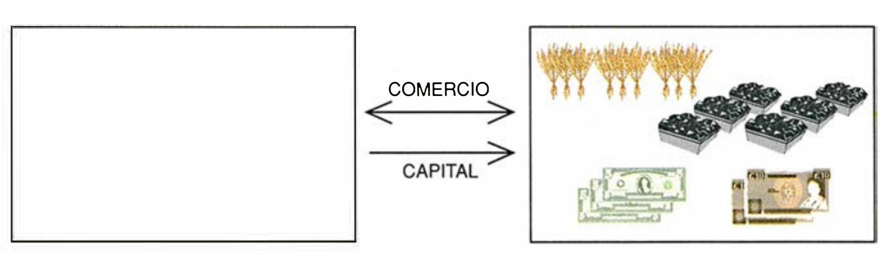
Así opera la ventaja comparativa



En ausencia de comercio internacional, la producción de un país depende por entero del capital y recursos propios. La producción unitaria de algunos bienes resulta, en comparación, menos cara que la de otros.



Cuando hay libre comercio, los países se especializan de acuerdo con las ventajas comparativas esperadas. Todo el capital de un país puede destinarse a la producción de una mercancía, sin que importen las diferencias de coste absoluto entre países. El capital no cruza las fronteras.



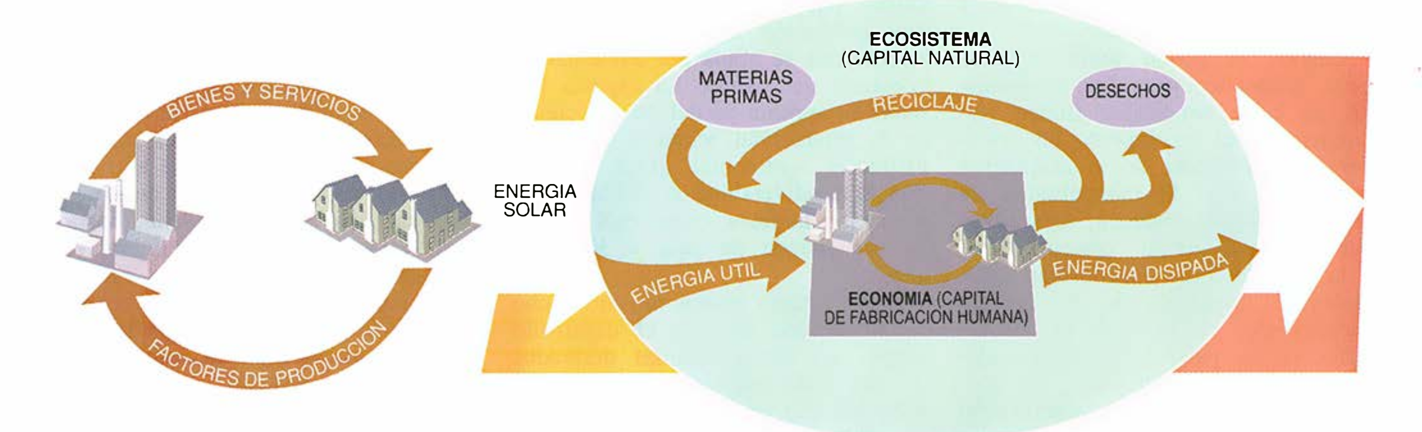
Si el capital también es móvil, puede optar por la ventaja absoluta, sobre las ventajas comparativas. Y así, un país podría acabar produciéndolo todo si tuviera costes absolutos más bajos.

El comercio internacional incrementa la competencia, y ésta rebaja los costes. Pero la competencia puede hacerlo de dos formas: aumentando el rendimiento o relajando las normas ambientales. Una empresa puede ahorrar dinero reduciendo, entre otros, sus niveles de control de contaminación, seguridad en el trabajo, salarios y atención sanitaria, soluciones que externalizan algunos de sus costes. Las empresas en liza que procuran el máximo de beneficios siempre tienen motivos para externalizar sus costes hasta donde se les conceda.

Precisamente por esta razón, las naciones crean aparatos legales, administrativos y fiscalizadores que prohíben saltarse las normas sociales y ambientales de las industrias propias. Pero no existe ese marco de operación a escala internacional; sólo hay leyes nacionales, muy diferentes de un país a otro. Por consiguiente, el libre comercio internacional estimula el traslado de las actividades industriales a los países con los niveles más bajos de internalización de costes. Resulta difícil sostener que esto constituya un paso hacia la eficiencia global.

Conseguir precios más baratos ignorando los costes reales es un atentado contra la eficiencia. Hasta el GATT reconoce que pedir a los ciudadanos de un país que compitan con el trabajo hecho en prisiones extranjeras sería llevar demasiado lejos la competencia basada en relajación de normas; de ahí que ese tratado admita la imposición de restricciones a dicho comercio. Pero no introduce la misma salvedad a propósito del trabajo de menores de edad, el peligroso y no asegurado o el pagado con salarios de miseria.

La solución más práctica sería permitir la imposición de aranceles compensatorios sobre el comercio a las naciones que no internalizan los



2. DIFERENCIAS entre la economía neoclásica y la de estado estacionario. La primera (*izquierda*) asimila la economía a un sistema aislado en el que el valor de cambio circula entre la industria y el consumidor. Ni la materia ni la energía entran o salen del sistema: la economía puede ser de cualquier tamaño. Desde el planteamiento del estado estacionario (*derecha*), la economía es sólo un componente de un ecosistema mayor en el que los materiales se transforman y la energía se convierte en calor. Conforme la economía aumenta de tamaño, su comportamiento debe ajustarse cada vez más al del ecosistema global.

costes por las que sí los internalizan. El "proteccionismo", que ampara una industria ineficiente frente a competidores extranjeros más eficientes, es una palabra nefanda en la jerga economista. Pero no lo es cuando se trata de apuntalar una eficiente política nacional de precios de coste total contra la competencia internacional que se apoya en una normativa permisiva.

Además, estos aranceles no carecen de precedentes. Los defensores del libre comercio tienden a alabar la imparcialidad de los aranceles "antidumping" que desalientan el comercio entre los países a precios inferiores a los costes de producción. La única diferencia real estriba en la decisión de incluir en ese cálculo los costes derivados del daño ambiental y de la merma de bienestar de la comunidad.

Esta política arancelaria no significa imponer las opciones ambientales o la moral de un país a otros. Cada nación debe establecer las reglas de internalización de costes en su propio mercado. Quien venda en un mercado nacional debe atenerse a las reglas estipuladas por el gobierno o pagar un arancel que elimine la ventaja comparativa de normas menos exigentes. Por ejemplo, según el Acta de Protección de los Mamíferos Marinos, todo el atún vendido en EE.UU. (de pescadores estadounidenses o mexicanos) debe contabilizar el coste asignado a la limitación de la matanza de delfines asociada a la pesca atunera. El atún que se vende en el mercado mexicano (de pescadores mexicanos o estadounidenses) no tiene que incluir estos costes. No se están imponiendo normas mediante un "imperialismo ecológico"; pagar los costes exigidos por las normas ambientales de una nación no es sino el precio por ser admitido en su mercado.

La verdad es que, bien mirado, el libre comercio sí es un imperialismo ecológico a la inversa. Cuando las empresas producen amparadas por normas más permisivas y venden sus productos en otro lugar sin sanción, están presionando a los países a reblandecer sus normas más duras. En efecto, el comercio irrestricto impone normas más bajas.

El comercio internacional irrestricto genera problemas de distribución de los recursos. En el mundo de las ventajas comparativas descrito por Ricardo, el capital de una nación se queda en casa, y sólo se comercia con las mercancías. Ahora bien, si las empresas gozan de libertad para colocar su capital dondequiera que sus costes de producción sean menores, entonces los países favorecidos no tienen una mera ventaja comparativa, sino una ventaja absoluta. El capital se moverá de un país a otro, acompañado quizá de "una enorme succión" al ir seguido por el trabajo y la riqueza. La especialización aumentará la producción mundial, pero sin garantía alguna de que se beneficien todos los países participantes.

Cuando el capital escapa al extranjero, cae el empleo interior y baja, por tanto, el precio del trabajo nacional. Aun cuando el libre comercio y el flujo de capitales eleven los salarios en los países con sueldos bajos (tendencia ésta que es frustrada por la superpoblación y alta tasa de crecimiento demográfico), lo hacen a expensas de la oferta de trabajo en los países con salarios altos; ensanchan así la desigualdad de rentas. La mayoría de los ciudadanos son asalariados. En EE.UU. el 80 % de la fuerza laboral se clasifica en el grupo de "empleados sin categoría jerárquica". Sus salarios reales han caído un 17 por ciento entre 1973 y 1990, por culpa, en buena parte, de la liberalización del comercio.

Tampoco el mercado laboral de los países con bajos salarios se beneficia necesariamente del libre comercio. Es probable que el NAFTA arruine a los campesinos mexicanos cuando pueda importarse sin trabas el maíz "barato" de los EE.UU. (subvencionado por ayudas a la agricultura y exención de impuestos a la hacienda federal). Los campesinos desplazados se ofrecerán por salarios menores. Venderán sus tierras a precios de saldo a las empresas agrícolas que producirán verduras de lujo y flores para el mercado estadounidense. Por ironía de las cosas, México ayuda a EE.UU. a mantener "barato" el maíz exportando sus propias reservas de petróleo, que están esfumándose, y sus razas de semillas, que EE.UU. necesita para mantener su monocultivo de maíz.

Los economistas neoclásicos admiten que la superpoblación puede trasvasarse de un país a otro en forma de mano de obra barata. En ese fenómeno se basan para oponerse a la inmigración sin cortapisas. Pero el capital puede migrar hacia la mano de obra abundante con mayor facilidad que ésta se desplaza hacia el capital. Así pues, la defensa legítima de la imposición de restricciones a la inmigración laboral puede exten-

derse fácilmente a las restricciones a la emigración de capital.

Cuando se ponen sobre la mesa estas contradicciones, los economistas de corte neoclásico suelen responder que el crecimiento las resolverá. El problema de la asignación connatural con la competencia de normas relajadas, aducen, debe abordarse a través de la "armonización" a la alta de todas las normas mundiales. El problema de distribución característico de la caída de los salarios en los países con sueldos elevados sería sólo transitorio; los economistas creen que el crecimiento acabará por subir los salarios en todo el mundo al nivel anterior del que gozaban los países con altos ingresos, o incluso más.

Ahora bien, el horizonte de una escala viable (o "sostenible") del uso de los recursos globales obliga a preguntarnos qué ocurrirá si toda la población del planeta empieza a consumir recursos con el ritmo en que lo hacen los países ricos. Los economistas neoclásicos prefieren ignorar la cuestión, cuando no dan una respuesta simplista: no hay límites.

El paradigma económico del estado estacionario sugiere una respuesta diferente. La capacidad de regeneración y de asimilación de la biosfera no puede soportar siquiera los niveles actuales de consumo de recursos, mucho menos el incremento múltiple necesario para generalizar el tren de vida de las naciones ricas. Y en absoluto puede resistir el ecosistema una población en incesante crecimiento que se afana por aumentar su consumo per cápita. La especie humana se apropia ya del 40 por ciento de la producción primaria de la fotosíntesis continental. ¿Qué ocurrirá con la biodiversidad si doblamos la población humana, como está previsto que suceda de aquí a 30 o 50 años?

Estos límites ponen en entredicho la posibilidad de que el desarrollo acabe con los problemas derivados de una mala asignación y peor distribución. Lo cierto es que el comercio libre se ha convertido en receta para acelarar la rebaja que la competencia imprime a las normas de eficiencia, equidad distributiva y viabilidad ecológica.

Pese a estos enormes problemas, la atracción de formar grandes emporios de mercado libre se siente en las empresas. Cuanto más extensa sea la región de libre comercio, menor será la responsabilidad de una empresa grande y menores las trabas u obligaciones que la aten a ninguna comunidad local e incluso nacional. Se hace entonces más fácil la separación espacial entre los lugares que sufren los costes y los que disfrutan los beneficios. La empresa podrá comprar mano de obra en los mercados baratos y vender sus productos en los de renta y salarios elevados. Cuanto mayor sea el mercado, más tiempo podrá una gran empresa eludir la lógica de Henry Ford, quien comprendió la necesidad de pagar lo bastante a sus obreros para que pudiesen comprar sus coches. Esta es la razón de que las multinacionales quieran el libre comercio, y se opongan trabajadores y ecologistas.

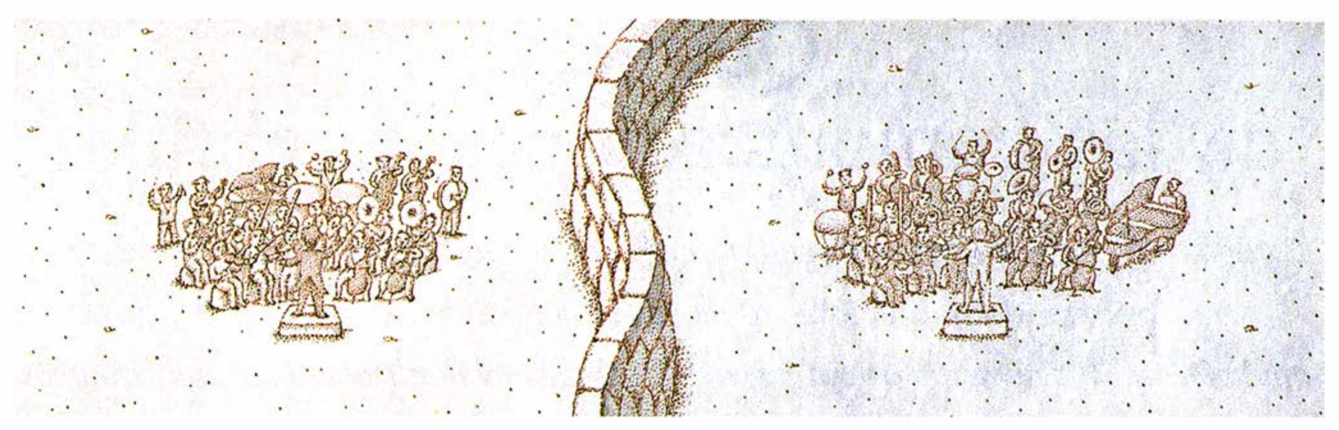
Desde la perspectiva del estado estacionario, la economía es un subsistema abierto en un ecosistema finito, de crecimiento nulo y materialmente cerrado. Un sistema abierto toma materia y energía del entorno y le devuelve los productos de desecho; en el sistema cerrado, la materia circula constantemente por su interior y sólo intercambia energía con el exterior. Se denomina rendimiento total de procesamiento ("throughput") a la transformación en producto ("output"), que sale del sistema, de las aportaciones ("input") que entran previamente. De la misma manera que un organismo vive consumiendo nutrientes y excretando productos de desecho, así una economía debe, hasta cierta punto, agotar y contaminar el ambiente. Una economía de estado estacionario es aquella cuyo rendimiento total se mantiene constante a un nivel en el que ni explota el ambiente más allá de su capacidad regenerativa, ni lo contamina por encima de su capacidad de absorción.

La mayoría de los análisis económicos neoclásicos parten del supuesto según el cual la economía es el sistema general y, la naturaleza, el subsistema. La economía es un sistema aislado en el que participa únicamente un flujo circular de valor de cambio entre las empresas y los consumidores. Ni la materia ni la energía entran o salen de este sistema. Por tanto, no hay restricciones para el crecimiento de la economía. Tal vez la naturaleza sea finita, pero se considera mero sector de la economía, que puede ser sustituido por otros sectores sin limitar el crecimiento.

Esta visión del flujo circular, útil para analizar los intercambios entre productores y consumidores, lleva ineludiblemente a conclusiones erróneas cuando se estudia la economía de escala; es decir, el tamaño de la economía en relación con el ambiente. Es como si un biólogo considerara un animal como un sistema circulatorio sin tener en cuenta el aparato digestivo o los pulmones. Semejante individuo sería independiente de su ambiente, y su tamaño carecería de importancia. Si pudiera moverse, sería una máquina de movimiento perpetuo.

Hace mucho tiempo, el mundo estaba relativamente vacío de seres humanos y de sus pertenencias (capital de fabricación humana) y bastante ocupado por otras especies y sus hábitats (capital natural). Años de crecimiento económico han modificado esa situación inicial. Como consecuencia, ha cambiado el factor limitante de un futuro crecimiento económico. Si el capital de fabricación humana y el capital natural fueran intercambiables, éste podría remplazarse enteramente. Pero son complementarios. Vale decir, la merma de uno impone límites al otro. ¿De qué sirven los barcos pesqueros si no hay peces? ¿Para qué los aserraderos sin bosques? Hubo un tiempo en que el número de peces que podían venderse en la lonja dependía de la capacidad y tripulación

3. AUMENTAR LOS INGRESOS en las naciones más pobladas y menos ricas será difícil. De aquí a 40 años se doblará la población. Para alcanzar el nivel más alto de renta per cápita, los países con una renta per cápita baja y media tendrían que multiplicar su uso de recursos casi por 36 veces (21 × 2 × 0,85). Para evitar infligir en el medio un daño correspondiente necesitarían elevar el rendimiento de su uso en la misma proporción.



4. LA AUTOSUFICIENCIA NACIONAL es un bien del que suelen olvidarse los defensores del libre comercio. Si es bueno que cada nación tenga sus propias orquestas sinfónicas y otras ofertas culturales, lo es también que mantenga sus propias industrias vitales.

de la flota pesquera; hoy la limitación está en los caladeros.

Mientras la escala de la economía humana era muy pequeña en relación con el ecosistema, no parecía un sacrificio incrementarla. Pero la escala de la economía humana ha alcanzado tal proporción, que ya no es razonable el crecimiento incruento. Si entendemos la economía como subsistema de un ecosistema finito, sin capacidad de crecimiento, habrá entonces una escala máxima para su rendimiento total de procesamiento de materia y energía. Y lo que reviste mayor importancia, habrá una escala óptima. El crecimiento económico por encima de este óptimo incrementaría los costes ambientales más deprisa de lo que crecerían los beneficios de la producción, iniciándose una fase antieconómica de empobrecimiento. Hay pruebas de que hemos traspasado ya ese umbral y, como Alicia a través del espejo, cuanto más rápido corramos, más nos rezagaremos.

La economía puede seguir desarrollándose cualitativamente sin cesar, pero no puede crecer sin fin y debe acabar por asentarse en un estado estacionario en sus dimensiones físicas. Esta situación no tiene por qué ser miserable. Compete a los economistas establecer la distinción elemental entre crecimiento (aumento cuantitativo del tamaño en virtud de la acumulación o asimilación de materiales) y desarrollo (evolución cualitativa hacia un estado más completo, mejor o diferente). Los cambios cualitativos y cuantitativos siguen leyes diferentes. El mezclar los dos lleva a una gran confusión.

El desarrollo sin crecimiento es un desarrollo viable. Una economía que se mantiene constante en su escala puede aún seguir desarrollando una mayor capacidad de satisfacción de los deseos humanos mejorando el rendimiento en el aprovechamiento de los recursos, fortaleciendo las instituciones sociales y aclarando sus prioridades éticas, pero no incrementando la explotación de los recursos.

A la luz de la distinción entre crecimiento y desarrollo, retomemos el tema del comercio internacional y consideremos dos cuestiones: ¿cuál es el efecto probable del libre comercio sobre el crecimiento? ¿Y sobre el desarrollo?

El libre comercio estimulará verosímilmente el crecimiento de la explotación, pues permite a un país traspasar sus límites de regeneración y absorción "importando" estas capacidades de otros países. Cierto es que un país que "exporte" algo de su nivel de saturación a cambio de productos importados podría haber aumentado aún más su rendimiento total de fabricar esos productos en casa. El comercio global, no obstante, permite posponer el día en que los países deban enfrentarse a su capacidad natural de regeneración y de absorción. El que algunos no hayan agotado su capacidad de saturación revela las limitaciones de su crecimiento interno, pero no significa que se trate de una decisión consciente de reservar esta capacidad para la exportación.

Al separar en el espacio los costes y los beneficios de la explotación ambiental, el comercio internacional dificulta su comparación. Y con ello aumenta la tendencia de las economías a sobrepasar su escala óptima. Además, obliga a los países a abordar restricciones ambientales más severas y de un modo menos secuencial de como habría sido si hubieran optado por otra política. Les quedan menos posibilidades de aprender de las experiencias ajenas en el control de la explotación y tienen también menos control sobre su entorno local.

Las razones que suelen esgrimirse en defensa del comercio libre basadas en la ventaja comparativa dependen, asimismo, de la promoción estática de la eficiencia. En otras palabras, el comercio libre en residuos tóxicos promueve la eficiencia estática al permitir su eliminación donde cueste menos según los precios y técnicas disponibles. Se alcanzaría un rendimiento más dinámico con la prohibición de exportar los residuos tóxicos. Este paso internalizaría los costes de la eliminación de estos productos en su lugar de origen, tanto para la empresa que los genera como para la nación bajo cuyas leyes opera. Esta política crearía un incentivo para encontrar formas técnicamente mejores de tratamiento de residuos o para rediseñar el proceso y evitar de entrada su producción.

Todos estos problemas de asignación, distribución y escala que plantea el libre comercio deben invertir la postura tradicional que, por defecto, lo favorecen. Las medidas para conseguir una mayor integración de las economías nacionales deben considerarse ahora una idea errónea a menos que se demuestre lo contrario en casos específicos. Como dijo Ronald Findley, la teoría de la ventaja comparativa bien podría ser "el resultado más profundo y hermoso de la ciencia económica", pero en un mundo de capital sin fronteras aplicarla es un billete para el viaje de la desintegración nacional.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POPULATION, TECHNOLOGY AND LIFESTYLE: THE TRANSITION TO SUSTAINABILITY. Dirigido por Robert Goodland *et al.*, Island Press, Washington, D.C., 1992.

MYTHS AND MISCONCEPTIONS OF FREE TRADE. Ravi Batra, Scribner's, 1993.

INTERNATIONAL TRADE AND ENVIRONMENT. Dirigido por Carl Folke *et al.*, número especial de *Ecological Economics*, vol. 9, n.º 1, febrero 1994.

Química de las comunicaciones cerebrales

La actividad del cerebro está regulada por la interacción de neurotransmisores y receptores. El esclarecimiento de la estructura de los receptores y de la dinámica de su activación arroja nueva luz sobre el modo de acción de los fármacos

Jean-Pierre Changeux

El cerebro se compone de unas células —las neuronas— que poseen la propiedad, única en el organismo, de formar una red discontinua por medio de múltiples prolongaciones finas y ramificadas, las dendritas y los axones. En el plano de los contactos, o sinapsis, la microscopía electrónica nos revela que las membranas de las células quedan separadas por varias decenas de nanómetros. La existencia de este espacio sináptico plantea el problema de los mecanismos de comunicación entre las neuronas.

Las neuronas son recorridas por impulsos eléctricos (estímulos nerviosos) provocados por el paso de iones (Na^+, K^+) a través de la membrana celular; salvo excepciones, la onda eléctrica no franquea la hendidura sináptica, y es ahí donde la química toma el relevo de la electricidad. Las neuronas sintetizan sustancias químicas, o neuromediadores, que se acumulan en vesículas situadas en las terminaciones nerviosas. Cuando un impulso eléctrico alcanza la terminación, el neurotransmisor se libera de estas vesículas hacia la hendidura sináptica; en una fracción de milisegundo se difunde por el espacio sináptico y llama a la puerta de la célula siguiente, dando origen a una nueva señal, por lo general, también eléctrica. En las sinapsis excitadoras, el transmisor provoca la apertura de canales por donde pasan los iones positivos Na^+ y K^+; cuando el neuromediador abre un canal selectivo para los iones negativos Cl^+, la sinapsis se torna inhibidora. Se realiza una transducción de la señal química en señal eléctrica, la cual da lugar, bien al inicio de un nuevo estímulo nervioso, bien a su inhibición. Desde que el británico T. Elliott propusiera este esquema en 1904, se han identificado más de 40 neuromediadores, y una neurona puede sintetizar y liberar varios de ellos a la vez. Por esta razón, las comunicaciones químicas desempeñan un papel preponderante en el funcionamiento del cerebro.

JEAN-PIERRE CHANGEUX es profesor en el Collège de France y en el Instituto Pasteur.

El hombre ha buscado en la naturaleza sustancias que reproduzcan el efecto de ciertos neuromediadores, como la nicotina del tabaco o el opio de la adormidera, o bien bloqueen su acción, como el curare, que los indígenas de América del Sur todavía utilizan para envenenar las flechas. El estudio del modo de acción de estos agentes ha desempeñado un papel decisivo en la comprensión de las comunicaciones químicas en el sistema nervioso. A partir de 1857, Claude Bernard estudió experimentalmente el efecto paralizante del curare; en sus *Leçons sur les effets des substances toxiques et médicamenteuses*, demuestra que el curare no actúa sobre el sistema nervioso central, sino sobre la periferia; produce la muerte por asfixia al bloquear la acción de los nervios motores sobre los músculos respiratorios. John Newport Langley continuó el análisis de Bernard sobre la placa motriz del músculo esquelético de pollo: demostró que la nicotina aplicada a concentraciones elevadas provoca una contracción del músculo. Al igual que la acetilcolina —neuromediador liberado por el nervio motor— la nicotina es un "agonista". Por el contrario, el curare no provoca contracción sino que bloquea el efecto de la nicotina: se comporta como "antagonista competitivo" de la acción de la nicotina, y por tanto de la acetilcolina. Langley demostró que, después de la denervación, el músculo sigue reaccionando a la nicotina y al curare, y sugirió que en la superficie del músculo existe un "compuesto especialmente excitable", que se combina con la nicotina y el curare, al cual dio el nombre de "sustancia receptora", o receptor. Observó también que "una gotita de nicotina situada en un lugar donde no toque una terminación nerviosa no produce efecto alguno, mientras que colocada sobre dicha terminación bloquea la contracción". En otras palabras, la sustancia receptora está concentrada en las cercanías de las uniones neuromusculares. Hubo que esperar más de sesenta años para que se materializara el concepto de receptor al identificarse el de la acetilcolina.

Sosteníase que las cantidades de receptor eran tan escasas que siempre escaparían al análisis químico. Además, no se comprendía cómo una "sustancia" de la membrana podría asociar la unión de un neuromediador con la abertura de un orificio por donde debían pasar los iones.

En los años sesenta, los estudios estructurales de moléculas, muy refinados, sobre la hemoglobina y diversas enzimas especializadas en la regulación pusieron de manifiesto las vías de salvar el obstáculo teórico.

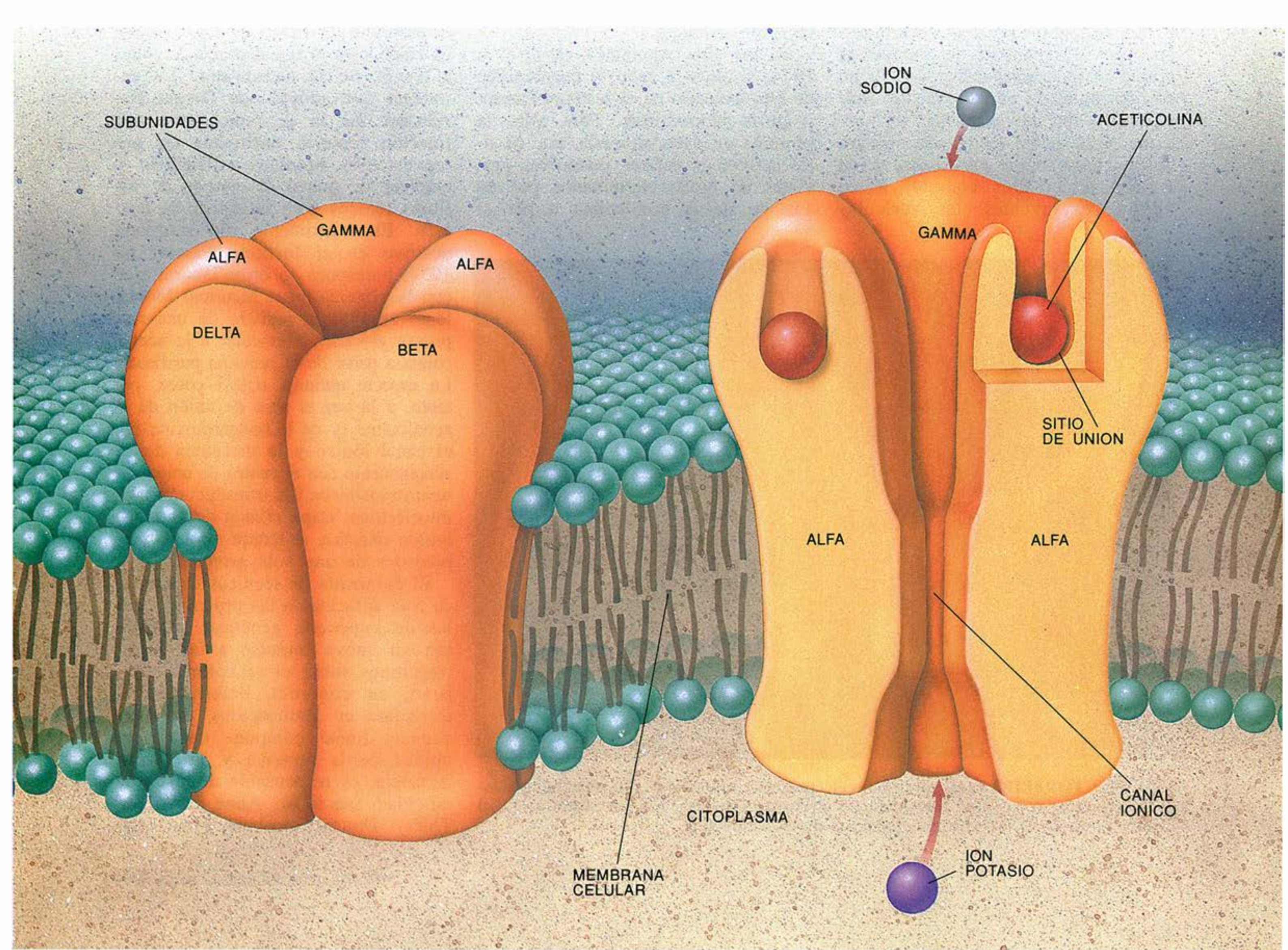
1. RECEPTOR de la acetilcolina, formado por cinco unidades (*izquierda*); fue el primer receptor de neurotransmisor en aislarse. Se demostró después que no sólo abarcaba sitios de enlace al neurotransmisor, sino que incorporaba también un canal transportador de iones (*derecha*). (Por mor de claridad, se ha prescindido de las subunidades beta y delta, así como de parte de una subunidad alfa.) Cuando el receptor entra en reposo se cierra el canal, abriéndose en cuanto las dos subunidades alfa se combinan con la acetilcolina.

Estas proteínas contienen en su estructura varias categorías de sitios distintos, separados por distancias importantes (del orden de 3 nanómetros) a escala molecular; la particular flexibilidad de la molécula proteica asegura el acoplamiento entre tales puntos. En el capítulo de conclusiones de mi tesis, sugerí la posibilidad de que este tipo de mecanismo "alostérico", formalizado inicialmente con Jacques Monod y François Jacob en 1963, y después con Jeffries Wyman, en 1965, interviniera en la transmisión sináptica.

La demostración concreta de este acoplamiento entrañaba una dificultad extraordinaria. En 1937, David Nachmansohn había franqueado una primera etapa. Tras su huida de la Alemania nazi, trabajó en París, en los laboratorios de la antigua Sorbona, sobre los peces eléctricos. Estas especies —torpedo, gimnoto— son conocidas, y temidas, por sus potentísimas descargas eléctricas. Se producen tales descargas por el disparo simultáneo de miles de millones de sinapsis cuyo neurotransmisor es la acetilcolina. Una acumulación tan enorme revestía sumo valor para el bioquímico: trabajar con un kilogramo de órgano eléctrico equivalía a trabajar con una sinapsis imponente de ese mismo peso. Nachmansohn percibió esta ventaja y pronto demostró que el órgano eléctrico del gimnoto contenía 1000 veces más acetilcolinesterasa (enzima que degrada la acetilcolina) que el músculo. Otra ventaja más es que las células que componen el órgano eléctrico —los electrocitos— son gigantes. En 1954, Schoffeniels y Nachmansohn aislaron por disección un electrocito, midieron su respuesta eléctrica a la acetilcolina y comprobaron su bloqueo por el curare; advirtieron que la farmacología del electrocito se parecía a la de la unión neuromuscular, o placa motriz, de los vertebrados superiores.

Para progresar en la química del receptor era preciso eliminar la célula con la que hasta entonces trabajaban fisiólogos y farmacólogos. Esta etapa crítica la superamos Michiki Kasai y yo en el Instituto Pasteur en 1970, valiéndonos del órgano eléctrico del gimnoto. Después de haber triturado el tejido, aislamos mediante centrifugación fragmentos minúsculos de membrana, del tamaño de un micrometro, que provienen del dominio inervado del electrocito señalado por la presencia de la acetilcolinesterasa. Estos fragmentos se cierran sobre sí mismos y conforman vesículas que pueden llenarse con iones de sodio o potasio radiactivos. La adición de acetilcolina a la suspensión de vesículas aumenta el flujo de iones Na^+ o K^+, y el efecto de la acetilcolina se bloquea por el curare. La respuesta de estas vesículas en el tubo de ensayo es análoga a la del electrocito vivo, y la transducción quimicoeléctrica permanece inalterada en un sistema acelular y químicamente definido. Además, para que la transducción se verifique no es necesario aportar ninguna otra energía que la proporcionada por el aumento de concentración del neurotransmisor.

Los fragmentos de membrana aislados constituyeron un material inapreciable para identificar la "sustancia receptora"; sin embargo, para poder seguir su rastro, había que etiquetarla con ayuda de un marcador radiactivo. Las primeras moléculas que se



utilizaron fueron la acetilcolina y el curare. El experimento fracasó por la sencilla razón de que estas moléculas se unían no sólo al receptor sino también a otras muchas estructuras.

La mordedura de diversas serpientes —bungaro, cobra— es mortal, debido a la presencia en su veneno de moléculas fuertemente tóxicas: entre ellas las toxinas α (como la bungarotoxina-α, un polipéptido de 74 aminoácidos), que fueron caracterizadas y purificadas por Chen-Yuan Lee. La bungarotoxina-α, con el efecto paralizador del curare, actúa a concentraciones bajísimas y de manera casi irreversible.

En la primavera de 1970, Lee acudió a mi laboratorio del Instituto Pasteur para presentar su trabajo sobre las toxinas del veneno de serpiente. Creía yo por entonces que la acetilcolinesterasa de la hendidura sináptica podía interaccionar con el receptor, idea que Lee no compartía. Con la convicción de que la toxina α debía interrumpir esa interacción, le propuse que analizara el posible efecto de dicha toxina sobre las preparaciones de órgano eléctrico de gimnoto que tenía en el laboratorio. El experimento no dio resultados, pues los fragmentos de membrana procedían de órganos eléctricos (y no de músculos) de peces, especies más primitivas que las serpientes de Lee. Semanas después, recibí una muestra de bungarotoxina-α purificada, y los ensayos efectuados con M. Kasai fueron concluyentes: las vesículas excitables quedaron totalmente bloqueadas y de manera irreversible; además, el curare, antagonista reversible, se oponía a la acción de la bungarotoxina-α; los experimentos sugerían que las dos substancias tóxicas se unían a un mismo receptor presente en las vesículas.

Para progresar en la identificación de la molécula portadora de ese sitio, era preciso aislarla y mantenerla en solución. En los meses precedentes, me había esforzado por conseguirlo, utilizando como marcador el decametonio, agonista radiactivo químicamente parecido a la acetilcolina, aunque resistente a la acetilcolinesterasa. Tras múltiples intentos infructuosos, logramos dispersar las membranas de las vesículas con un detergente suave, el desoxicolato de sodio, sin que por ello se perdiera el enlace del decametonio; había que determinar, sin embargo, la naturaleza de la molécula así aislada. La bungarotoxina-α despejó todas las dudas. En el tubo de ensayo, ésta bloqueaba la unión del decametonio a una molécula soluble de gran tamaño, que se podía separar de la acetilcolinesterasa. Todo hacía pensar que la molécula en cuestión era el receptor fisiológico.

En los años siguientes, de 1972 a 1974, se llevó a cabo la purificación de esta molécula en el Instituto Pasteur y otros laboratorios. Para ello, la proteína quedaba atrapada, por su sitio activo, en esferas insolubles provistas de brazos terminados por un análogo de la acetilcolina o por la bungarotoxina misma. Inmediatamente después, se separaban las esferas del extracto crudo y se liberaba la proteína de su trampa mediante un exceso de acetilcolina. La masa molecular de la proteína purificada es del orden de 300.000 dalton. Observada al microscopio electrónico por Jean Cartaud a partir de mis preparaciones del año 1973, se presenta en forma de roseta de unos ocho nanómetros de diámetro, con una depresión central. Cada molécula consta de cuatro tipos de subunidades diferentes, α, β, γ y δ, cada una con masa molecular de unos 50.000 dalton, asociadas en un pentámero de fórmula $\alpha_2\beta\gamma\delta$. Arthur Karlin demostró que los centros activos estaban situados principalmente en las subunidades α; la molécula del receptor no parecía presentar apenas propiedades de simetría. Pero eso era pura apariencia.

El químico no podía contentarse con haber identificado una especie nueva. ¿Podía asegurarse que la molécula purificada no había perdido su función o sus funciones? ¿Sólo teníamos en la mano el elemento de reconocimiento de la acetilcolina, o, por el contrario, no contendría también la proteína purificada el canal iónico utilizado para la transferencia de iones a través de la membrana? La estrategia que adopté con Gerald Hazelbauer fue la de reincorporar una fracción proteica purificada en microvesículas lipídicas artificiales y emplear de nuevo el método de los flujos iónicos para examinar su función. El experimento dio resultado positivo en el Instituto Pasteur en 1974, y después en otros laboratorios con la proteína pura: Mauricio Montal logró en 1980 el registro de una respuesta eléctrica elemental a la acetilcolina a partir de la proteína purificada. La especie química $\alpha_2\beta\gamma\delta$ posee, por tanto, a la vez el sitio de unión de la acetilcolina (y de la bungarotoxina–α), el canal iónico y la mecánica de su acoplamiento con el centro de unión del neurotransmisor. La transducción quimioeléctrica, etapa crucial de la transmisión sináptica, se reduce así a las propiedades de una sola proteína.

El desarrollo de técnicas de química fina aplicadas a las proteínas, más las de ingeniería genética, imprimirán un nuevo impulso a las investigaciones sobre el receptor. Permitirán, en concreto, determinar su estructura en aminoácidos, cuya secuencia lineal compone cada subunidad de la proteína y, en última instancia, es responsable de su especificidad funcional. Anne Devillers-Thiéry, Donny Strosberg y yo esta-



2. EL PEZ TORPEDO posee un órgano eléctrico con millares de sinapsis, todas idénticas, cuyo disparo genera una poderosa descarga eléctrica. Ha permitido aislar el primer receptor de un neuromediador: el de la acetilcolina.

blecimos, en 1979, la secuencia de los 20 primeros aminoácidos del dominio de la subunidad α correspondiente al extremo amino. Una primera tarjeta de identidad del receptor se había conseguido con el torpedo europeo, el denominado "jaspeado". Raftery, Lee Hood y sus colaboradores confirmaron este resultado con el torpedo californiano, e incluso fueron más lejos. Al determinar la secuencia de los 54 aminoácidos terminales de cada una de las cuatro subunidades, demostraron que, contra todas las expectativas, las secuencias de estas subunidades presentaban semejanzas bastante acusadas: del 35 al 50 % de los aminoácidos eran idénticos de unas cadenas a otras. Los biólogos moleculares confieren a esta homología una significación de parentesco evolutivo. En el curso de la evolución de las especies, los genes que codifican las subunidades α, β, γ y δ se habrían desdoblado dos veces a partir de un gen ancestral común. Y lo que aún es más importante, estas identidades sugerían que la roseta constitutiva de la molécula del receptor se organizaba alrededor de un eje de "pseudosimetría" de orden 5.

La identificación de las secuencias completas de cada subunidad iba a confirmar este punto. Ello se consiguió aplicando los métodos de la genética molecular. En 1982, cuatro laboratorios anunciaron el clonado de una de las cadenas del receptor: el de Stephen Heinemann y James Patrick del Instituto Salk, el nuestro, el de Eric Barnard de la Universidad de Cambridge, y, sobre todo, el de Shosaku Numa de la Universidad de Kyoto. Este último logró en pocos meses establecer las secuencias completas de las cuatro cadenas α, β, γ y δ del torpedo californiano, y después la del músculo humano. El análisis de la proximidad de aminoácidos hidrófilos e hidrófobos a lo largo de las cuatro cadenas sugería un mismo modo de plegamiento de cada subunidad sobre sí misma. Un gran dominio hidrófilo en el extremo amino quedaría expuesto hacia la hendidura sináptica, otro menor en el extremo carboxílico estaría en contacto con el citoplasma, y cuatro segmentos hidrófobos de unos 20 aminoácidos atravesarían la membrana. La "serpiente" peptídica pasaría por la membrana cuatro veces, y la cola del extremo carboxílico quedaría del mismo lado que la cabeza correspondiente al extremo amino, con respecto a la hendidura sináptica. Si este modelo hipotético se correspondiese con la realidad, sería previsible que el sitio receptor se organizase a partir del gran dominio hidrófilo del extremo amino, y que el canal iónico lo hiciera a partir de uno de los segmentos hidrófobos transmembranales. Las investigaciones que siguieron demostraron el acierto de estos supuestos.

El objetivo primero de los métodos de la genética molecular es el de aislar genes de ADN o sus transcritos de ARN mensajero, para luego deducir la secuencia completa de la proteína que codifican. Otra aportación, no menos importante, es la posibilidad de conseguir la expresión de estos genes o sus transcritos en un medio celular, incluso en el tubo de ensayo, más fácil de manipular que el electrocito del torpedo o la fibra muscular humana. El oocito de rana se presta muy bien a este género de experimentos: se inyecta el ARN mensajero en el citoplasma (o el ADN en el núcleo), y el oocito sintetiza la proteína correspondiente. Se obtuvo resultado positivo con el receptor de la acetilcolina. Ricardo Miledi y E. Barnard registraron en 1982 una respuesta eléctrica en oocitos en los que habían introducido el ARN mensajero del receptor de acetilcolina. S. Numa y su grupo obtuvieron en 1983 el mismo resultado en un sistema mejor definido, en el que se habían inyectado en el oocito los ARN mensajeros de cada una de las subunidades α, β, γ y δ del receptor de torpedo. La reconstitución de la transducción quimioeléctrica que se había obtenido diez años atrás con la proteína purificada, se hacía posible en lo sucesivo a partir de ARN mensajero, e incluso a partir de ADN.

Estos desarrollos tecnológicos abrían dos vías de investigación complementarias: permitían una disección fina de los dominios funcionales de la proteína mediante corte y reintroducción de secuencias génicas, y ofrecían el medio de explorar otros tipos de receptores.

Se sabía que ciertas neuronas del cerebro de los vertebrados superiores (entre ellos el hombre) sintetizan y liberan acetilcolina. Se sabía igualmente que este compuesto es reconocido por receptores que también se unen a la nicotina. La bungarotoxina se une a algunos de ellos, pero no a otros; una nueva toxina del veneno de bungaro reacciona con algunas otras. En resumen, reinaba cierta confusión en el mundo de los receptores de la nicotina.

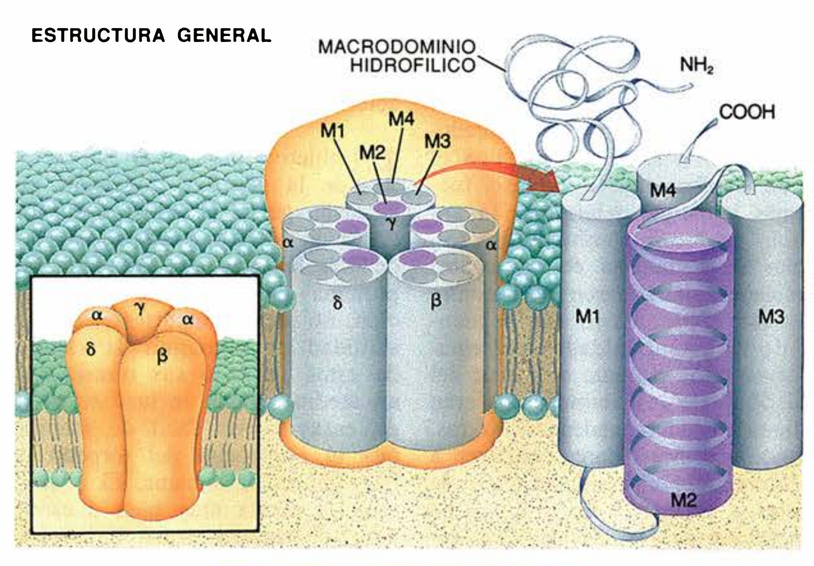
J. Patrick y J. Heinemann y Marc Ballivet despejaron el panorama al apostar por una semejanza entre las secuencias aminoacídicas de los receptores cerebrales y las del receptor del músculo o del órgano eléctrico, similaridad suficiente para poder "pescarlas" con "secuencias anzuelo" de receptor de músculo o de torpedo. Apostaron y ganaron. En 1986 se aislaron varios clones a partir del cerebro de rata o de pollo, correspondientes a los receptores. Hasta el presente se han identificado siete subunidades muy similares a la subunidad α del músculo; otras tres, menos parecidas, han quedado registradas como no-α. Inyectadas en el oocito, estas secuencias se expresan bajo la forma de un receptor funcional de membrana, a condición de que, por lo menos, una subunidad de tipo α esté asociada a una subunidad de tipo β. Una subunidad del cerebro de pollo, la denominada α_7, posee incluso la notable propiedad de formar receptores funcionales pentaméricos asociándose consigo misma. Un receptor muy simple, compuesto por un solo tipo de subunidades y, por tanto, perfectamente simétrico, da una respuesta típica a la acetilcolina que, además, es bloqueable por la bungarotoxina–α. Este sencillísimo sistema permitirá progresar en el análisis fino de la molécula del receptor.

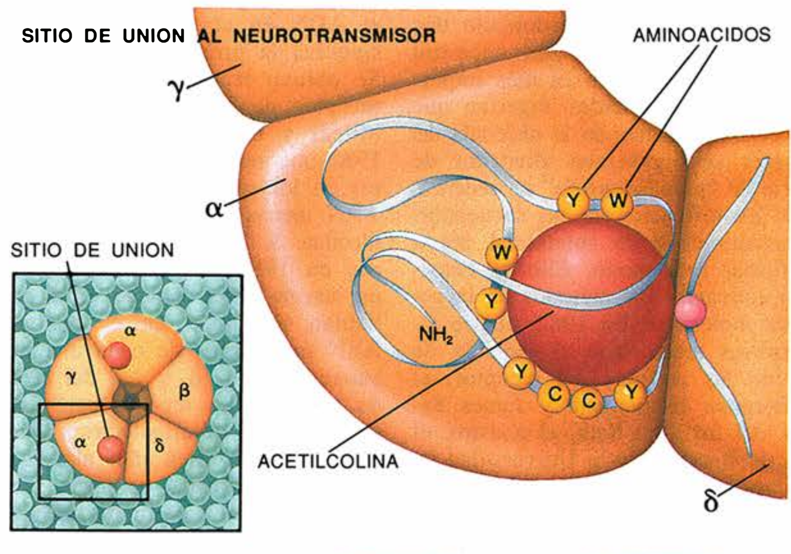
Quedaba así identificada la familia de los receptores de acetilcolina en el cerebro de los vertebrados superiores y del hombre. Muy pronto aparecieron otros receptores de neurotransmisores: si el cerebro aloja decenas de neuromediadores, no todos producen el mismo efecto que la acetilcolina. Algunos, como la glicina o el GABA (ácido γ-aminobutírico), en vez de provocar la apertura de un canal permeable a los iones Na^+, K^+, Ca^{++} (dotados todos de carga positiva), facilitan el transporte de iones Cl^- (con carga negativa): la consecuencia es un efecto eléctrico de signo contrario al que desencadena la acetilcolina. Estos neurotransmisores inhiben los efectos excitadores ejercidos por la acetilcolina u otros neuromediadores cerebrales como el glutamato, carácter inhibidor que proviene de las propiedades iónicas del canal asociado al receptor.

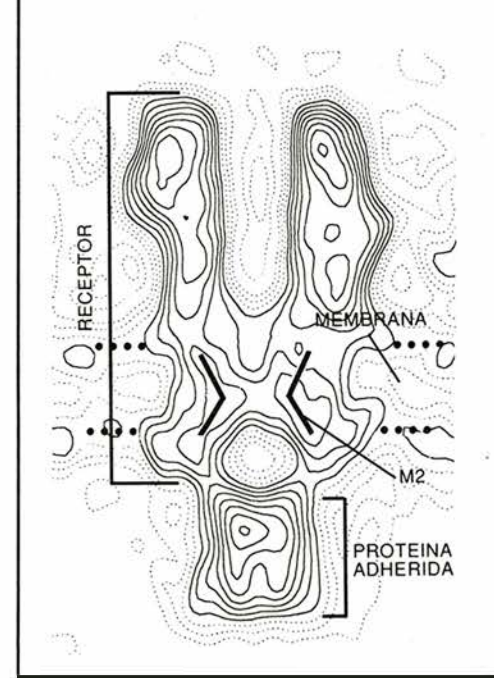
Era, pues, de esperar que los receptores de la glicina o del GABA difiriesen radicalmente del receptor de la acetilcolina. Pero, en 1987, el grupo de Heinrich Betz y el de E. Barnard rechazaron de plano esa posibilidad: aunque la secuencia de todos estos receptores sea diferente, existe un reparto global de los aminoácidos en dominios hidrófilos e hidrófobos, muy parecidos al de los receptores de la acetilcolina. Esta conclusión se ha extendido recientemente a los di-

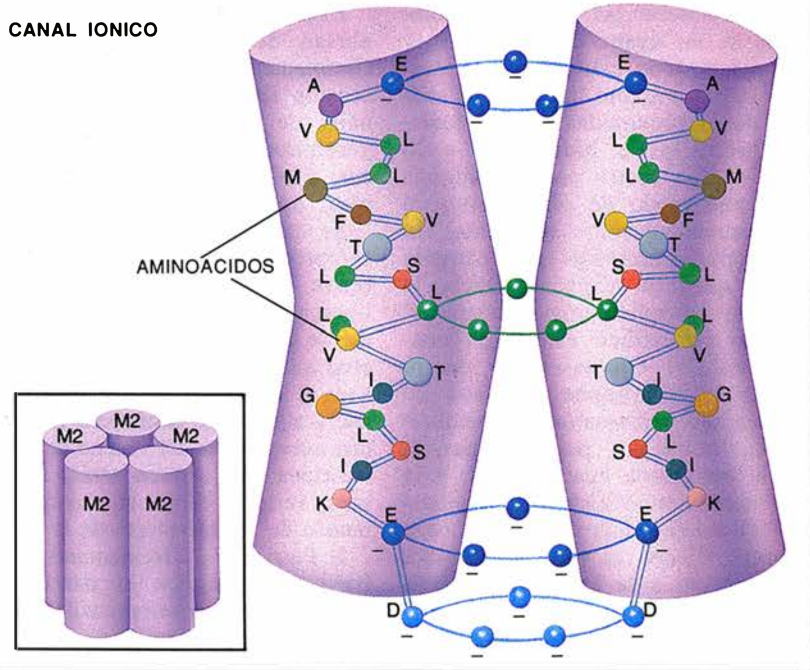
Anatomía del receptor de la acetilcolina

La molécula del receptor consta de cinco unidades (*recuadro superior*), ilustradas por cilindros (*arriba, centro*), formada cada una a partir de una proteína que se ha plegado sobre sí misma (*a su derecha*). Las unidades presentan una extensa región hidrofílica lindante con el extremo amino (NH_2), así como cuatro segmentos membranales hidrofóbicos: M1, M2, M3 y M4. Los sitios de unión con el neurotransmisor, vistos aquí en corte transversal (*recuadro del centro*), son sobre todo aminoácidos que residen en la extensa región hidrofílica de las subunidades alfa (*a su derecha*). Participan también las subunidades vecinas (*esfera rosa*). El canal iónico, constituido por cinco segmentos M2 (*recuadro inferior*), contiene varios anillos aminoacídicos que intervienen en la operación del receptor. Hay tres de ellos dotados de carga negativa (*coloreados de azul en la pormenorización de dos segmentos M2 de un receptor específico de acetilcolina*) cuya misión es sacar por el canal iones con carga positiva. El anillo de leucina, sin carga, que aparece en verde, y donde verosímilmente se doblan los segmentos M2, interviene en el cierre del canal iónico cuando el receptor se torna insensible a la acetilcolina. El mapa de densidad electrónica (*abajo*), un corte del receptor, revela la probable orientación de dos segmentos M2 (*barras negras*). Realizó la imagen Nigel Unwin, del Consejo británico de Investigaciones Médicas en Cambridge.





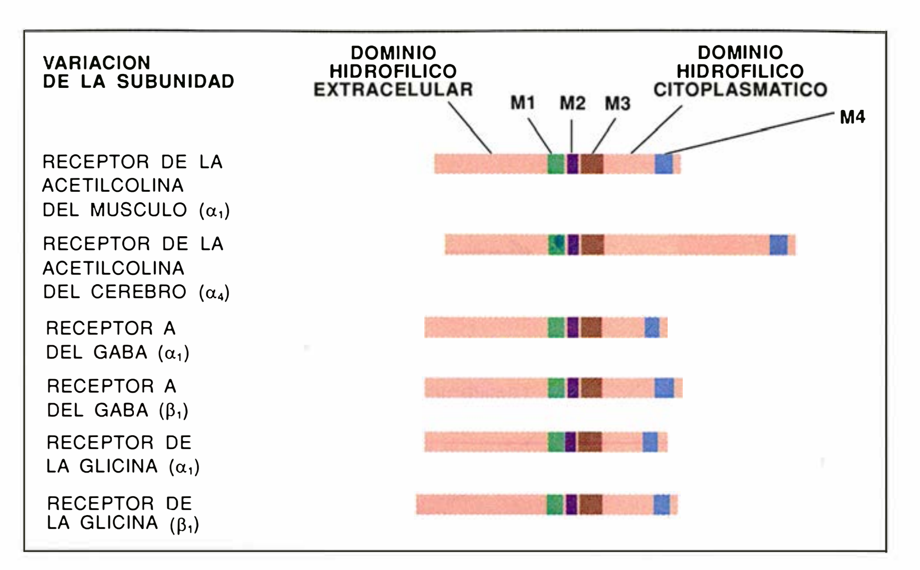




versos tipos de receptores del glutamato. Se trata de moléculas con rasgos análogos, lo que lleva a pensar que pertenezcan a una sola superfamilia de receptores.

Pese a esta semejanza, el repertorio de receptores de neurotransmisores de nuestro cerebro es variadísimo. Se conocen 12 subunidades distintas para el receptor de la acetilcolina, y al menos otras tantas para el receptor del GABA y del glutamato. Las diferentes subunidades de un mismo receptor pueden combinarse para dar moléculas funcionales cuyas propiedades farmacológicas divergen notablemente.

Con el receptor nicotínico, la respuesta de las combinaciones $\alpha_3\beta_2$ y $\alpha_4\beta_2$ (pero no de la $\alpha_2\beta_2$) se bloquea por la bungarotoxina neuronal. El receptor formado a partir de α_7 reconoce la bungarotoxina–α como receptor del músculo. Las benzodiazepinas redoblan la respuesta de los receptores inhibidores del GABA al fijarse sobre un sitio "alostérico" distinto del que corresponde al neurotransmisor: ahora bien, sólo ciertas asociaciones de subunidades de este receptor son sensibles a las benzodiazepinas. Por último, la distribución de las diversas subunidades de la mayoría de los receptores difiere de una región a otra del cerebro.



3. SECUENCIAS DE LOS AMINOACIDOS de la superfamilia de receptores vinculados a un canal iónico. Se observa la existencia de dominios comunes, cuatro segmentos hidrófobos transmembranales M1 a M4, un gran dominio hidrófilo sináptico (DS) y un pequeño dominio hidrófilo citoplásmico (DC).

La proteína receptora funcional es un edificio compacto que resulta del plegamiento de las cadenas lineales de los aminoácidos: es esta disposición lo que determina la función de reconocimiento del neurotransmisor y la transducción de la señal eléctrica en señal química. La identificación de los aminoácidos componentes de un centro activo depende de unos métodos de exploración que permitan marcarlos, "en su sitio", sobre la proteína. Un método de muy buena calidad es la marcación por afinidad, basada en el empleo de una molécula que se fija sobre el centro activo con una buena afinidad. En el caso del receptor de acetilcolina del órgano eléctrico se utiliza, por ejemplo, el feniltrimetilamonio (PTA) que, al igual que la acetilcolina, posee un amonio cuaternario. Una vez unido al centro, este compuesto debe poder quedarse enlazado al mismo de manera irreversible por un grupo reactivo, como es por ejemplo un grupo diazonio. Una molécula de este tipo es la del TDF, inicialmente sintetizado por Léon Wolfsy y Jon Singer para trabajos de inmunología; en 1967, yo lo ensayé con el electrocito de gimnoto. El TDF actúa a modo de compuesto suicida, que bloquea irreversiblemente el centro activo del receptor. Un año después, A. Karlin utilizó una molécula muy parecida, el MPT, y descubrió la presencia de la cisteína, un aminoácido azufrado, en el centro activo del receptor, en el que normalmente se encuentra enlazado mediante un puente -S-S- con otra cisteína inmediatamente adyacente. En 1984, identificó este doblete en las posiciones 192-193, dentro de la subunidad α de un receptor de torpedo.

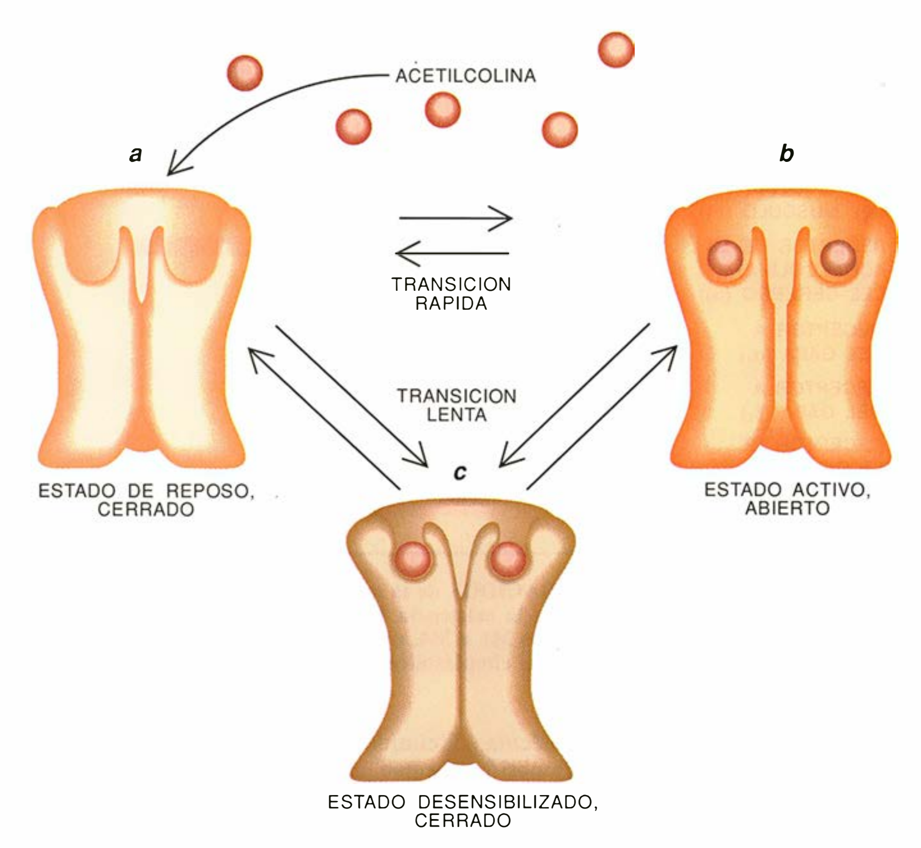
En trabajos más recientes se ha demostrado que otros aminoácidos contribuyen al engarce de agonistas y antagonistas al receptor de torpedo. Su identificación se ha conseguido gracias al DDF, un compuesto muy parecido al TDF, con un grupo dimetilamonio en vez de un amonio cuaternario. Este compuesto, a diferencia de lo que ocurre con el TDF, debe ser activado por la luz para reaccionar. Los investigadores utilizaron una técnica sagaz: activar el DDF de una manera indirecta, mediante la luz que emiten los aminoácidos presentes en el centro o sitio activo al ser ellos mismos irradiados. Sólo las moléculas ligadas al centro van a activarse y por tanto a reaccionar con el marcador, lo que eleva considerablemente su especificidad.

Michael Dennis, Jérôme Giraudat, Jean-Luc Galzi y yo identificamos en el período que va de 1988 a 1990 los aminoácidos marcados por el DDF. Se ha confirmado el marcaje de las dos cisteínas identificadas por Karlin, al tiempo que se han descubierto varios aminoácidos más en otros dos bucles de la subunidad–α. En todos los casos se trata de aminoácidos de núcleo aromático (tirosina, triptófano). Reunidos con el puente disulfuro, forman una especie de "cúpula" cargada negativamente, en la cual se aloja la carga positiva del amonio cuaternario de la acetilcolina.

En 1991, J.-L. Galzi, A. Devillers-Thiéry y yo, en colaboración con Daniel Bertrand demostramos que la mutación de cualquiera de estos aminoácidos de la subunidad α_7, expresada en el oocito de rana, entraña una pérdida de afinidad aparente por la acetilcolina: participan, pues, en la función de reconocimiento del neurotransmisor. Y aún más, todos están presentes en la amplia gama que va desde la subunidad α_1 del receptor de torpedo hasta las cadenas múltiples del receptor cerebral, atestiguando el reconocimiento de la acetilcolina por el receptor. El hombre conserva en el cerebro la huella de una rúbrica impuesta hace más de 300 millones de años.

Los tres bucles que componen el centro activo del receptor forman parte del gran dominio hidrófilo del extremo amino de la subunidad α. Este dominio se encuentra así expuesto hacia el espacio sináptico y dispuesto a recibir la acetilcolina que, liberada por la terminación nerviosa, va a provocar la apertura del canal iónico.

La identificación de la vía de paso de un ion Na^+ o K^+ a través de una molécula de proteína plantea el problema de definir la estructura de un canal. El método de marcaje de afinidad, también aquí, aporta la solución. Los farmacólogos y toxicólogos habían observado que ciertas drogas, como los anestésicos locales empleados por los dentistas, o toxinas de la piel de rana como la histrionicotoxi-



4. NATURALEZA DINAMICA del receptor de acetilcolina, puesta de manifiesto en su capacidad para adoptar múltiples conformaciones. En su estado de reposo (*a*), el receptor muestra baja afinidad por la acetilcolina, y se cierra su canal iónico. Si queda expuesto, por breve tiempo, a una elevada concentración de neurotransmisor, adquiere la forma activa, de canal abierto, durante los milisegundos (*b*) que preceden a la liberación de la acetilcolina, para tornarse al estado de reposo. Ante un suministro incesante de acetilcolina, los receptores en reposo y activos pueden alcanzar un estado de desensibilización (*c*). En esta condición, el receptor permanece unido a la acetilcolina durante segundos o minutos y mantiene un canal cerrado.

na, bloqueaban la respuesta eléctrica a la acetilcolina, si bien de una manera diferente a la del curare: era una inhibición no competitiva, por lo que se había avanzado la idea de que estos compuestos se oponían directamente al canal iónico.

Ervin Neher y Joe Steinbach aportaron una prueba electrofisiológica mediante la técnica del pinzamiento de membrana. Con el registro de la apertura de canales activados por la acetilcolina, demostraron que los inhibidores de este tipo, a diferencia del curare, "interrumpían" estas aperturas durante cortos intervalos, cuando el compuesto mostraba una afinidad débil, o durante intervalos más prolongados, si la afinidad era más intensa. Acontecía como si el compuesto entrase en el canal abierto, y una vez allí lo obstruyese durante un tiempo más o menos largo según su afinidad. Si, por fortuna, existiera un "tapón fotoreactivo" capaz de reaccionar con los aminoácidos que bloquean su avance por el canal, se dispondría de un medio para identificar los aminoácidos que forman la parte estrecha del canal. El experimento funcionó con una de esas sustancias: la clorpromazina. Como demostraron mis colaboradores Thierry Heidmann y Robert Oswald en 1983, esta molécula se une con elevada afinidad a sitios pertenecientes a una categoría particular, diferente de la del centro de reconocimiento de la acetilcolina. Una serie de ensayos corroboró que la clorpromazina penetraba en el canal iónico y, una vez en su interior, se enganchaba de manera irreversible a sus paredes.

La identificación de los aminoácidos marcados con la clorpromazina ha confirmado esta interpretación. Tras purificar los fragmentos peptídicos marcados, J. Giraudat, M. Dennis, T. Heidmann, J. Chang y yo llegamos, a finales del año 1985, a la convicción de que la clorpromazina se fijaba sobre la cadena δ en la serina de la posición 262, en el segmento hidrófobo M2. Experimentos de mutagénesis dirigida, realizados por los grupos de S. Numa y Bert Sakmann confirmaron que las paredes del canal iónico se formaban a partir de cinco segmentos M2 de cada subunidad del receptor, y que tres anillos de aminoácidos de carga negativa (glutamato, en particular), situados en los extremos del segmento hidrófobo M2, controlaban el transporte de iones. El sitio de enlace de los bloqueadores del canal se encontraría en el segmento que atraviesa la membrana y estaría enmarcado por anillos cargados negativamente, uno de ellos colocado del lado sináptico, y los dos restantes del lado citoplasmático de la membrana.

El segmento M2 es distinto del gran dominio hidrófilo marcado por los ligandos covalentes del centro activo sobre la subunidad α, aunque eso no prejuzga su distancia sobre la proteína nativa, donde cada subunidad está plegada sobre sí misma de manera muy compacta. Se ha medido la distancia entre el sitio de los bloqueadores del canal y los sitios de enlace de la acetilcolina: es de unos 4 nanómetros, distancia parecida a la que separa los grupos hemo de la molécula de hemoglobina (alrededor de 3 nanómetros). Las interacciones entre sitios receptores y canal iónico se efectúan "a distancia"; como se preveía, son indirectas o "alostéricas".

Los receptores del GABA y de la glicina tienen canales selectivos para los aniones. Los segmentos M2 de los receptores, sin embargo, se asemejan bastante a los de los receptores de la acetilcolina. Se ha demostrado por recientes ensayos que algunos anillos de aminoácidos, todos situados en el segmento M2 o en su cercanía, son suficientes para determinar el carácter aniónico o catiónico del canal. Los distintos miembros de la superfamilia de receptores-canales presentan, pues, una arquitectura molecular, constante en sus líneas maestras, aunque difieran por la naturaleza de ciertos aminoácidos situados en posiciones críticas, lo cual basta para conferir a la molécula la especificidad de reconocimiento del neurotransmisor y la del ion transportado.

La acción fisiológica principal del neurotransmisor sobre su receptor es la de provocar la apertura del canal al que está asociado, gobernando así las propiedades eléctricas de la membrana celular, aunque sea el receptor mismo el que contiene en su estructura los medios para regular su propia eficacia. El neuromediador asegura no sólo la transmisión de la señal, sino también la modulación de dicha transmisión.

La transmisión de la señal se produce en el restringido espacio de la hendidura sináptica. En la placa motriz del músculo estriado, la llegada del impulso eléctrico a la terminación nerviosa libera unos tres millones de moléculas de acetilcolina, pero el volumen de la hendidura es tan pequeño que la concentración local de acetilcolina se eleva enormemente durante un tiempo muy breve, antes de difundirse allende el espacio sináptico. De ahí resulta un "impulso químico", que franquea dicho espacio en menos de un milisegundo para llegar a las moléculas de receptor extendidas en una capa casi continua sobre la cara posterior de la sinapsis. La afinidad de la acetilcolina por el receptor es muy débil, y ello le permite disociarse rápidamente del receptor tras haberse unido a él y haber provocado la apertura del canal; el receptor queda así dispuesto para actuar de nuevo, sin tiempo muerto. Los parámetros físico-químicos de la interacción entre receptor y neurotransmisor están ajustados para que la transmisión sea veloz, fiable y repetitiva.

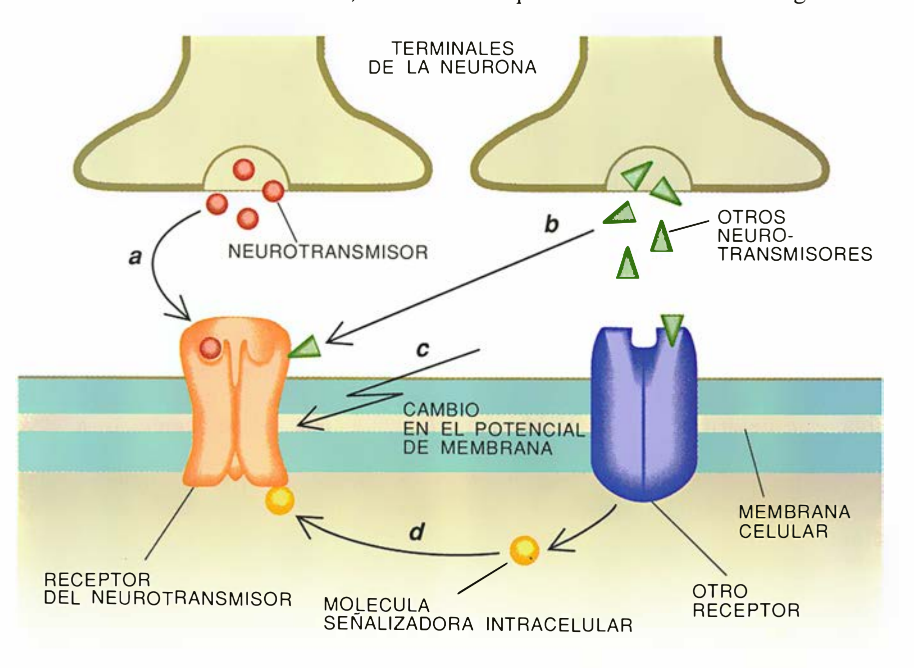
Pero ya en 1905, Langley observó que la aplicación prolongada de acetilcolina sobre el músculo de ave provocaba, primero, la contracción del músculo y, luego, el bloqueo de la respuesta a la acetilcolina. En tales condiciones un tanto artificiales, en las que el neurotransmisor se pone en contacto con el agente farmacológico durante tiempos mucho más prolongados que la señal fisiológica, el músculo, una vez que ha transmitido la señal, se torna refractario a ésta. Se produce una "desensibilización" de la respuesta. Sir Bernard Katz y su colega sueco Stephen Thesleff analizaron, en 1957, el desarrollo temporal de este proceso y manifestaron que consumía un tiempo mucho mayor que el de apertura del canal: una décima de segundo por minuto. Para interpretar sus resultados, propusieron un esquema teórico, según el cual la estabilización del receptor en el estado desensibilizado surgía sólo cuando la acetilcolina se fijaba, sobre este estado, con afinidad más elevada —es decir, a concentraciones más débiles— que sobre el estado "activable" de la membrana en reposo. Los estudios de la bioquímica del receptor demostraron que esta interpretación tenía buena base.

Desde los primeros esfuerzos por aislar el receptor, las mediciones del enlace de la acetilcolina con éste se realizaban "en equilibrio", es decir, dejando al neurotransmisor en contacto prolongado con el receptor. La unión de la acetilcolina se producía a concentraciones muy bajas, mucho menores que las que abren el canal. Los farmacólogos han tendido siempre a considerar que cuanto más activo es un compuesto a bajas concentraciones, más evidente es su significación fisiológica. Michel Weber, Jonathan Cohen y yo vislumbramos, a partir de 1974, que ése no podía ser el caso de un receptor sináptico funcional. Una afinidad alta significa una disociación lenta y, por tanto, un bloqueo de la transmisión. La elevada afinidad observada en el equilibrio sólo podía corresponder a un estado inactivo.

Quedaba todavía por descubrir el estado activable, y éste tenía que caracterizarse por una afinidad débil y transitoria, difícil de capturar. Era preciso medir simultáneamente, y sobre la misma preparación, los parámetros físico-químicos del receptor y su estado funcional en períodos de tiempo muy breves, del milisegundo al minuto. Los primeros datos experimentales concordantes con lo esperado fueron recogidos por Weber en 1975, mediante mezcla y filtración rápida, si bien hubo que recurrir a métodos desarrollados por los químicos, en particular por M. Eigen los cuales permiten medir las reacciones en los dominios de tiempo deseados. Los resultados no dejan lugar a dudas. Cuando la acetilcolina abre el canal durante la transmisión, el receptor se encuentra en un estado de afinidad débil; la acetilcolina se fija con afinidad elevada en un estado desensibilizado. La conversión de un estado en otro es lenta, dentro de un abanico de tiempos que va de la décima de segundo a varios minutos.

El receptor purificado y reconstituido, como demostramos Jean-Luc Popot, Thierry Heidmann, André Sobel y yo en 1981, conserva la capacidad de desensibilizarse. Se trata, pues, de una propiedad intrínseca de la molécula de la proteína receptora, también presente en los receptores neuronales. Siendo así, esa propiedad ha de poderse analizar mediante la mutagénesis de los aminoácidos críticos de la molécula del receptor neuronal α7. Y lo demostramos en 1991 Frédéric Revah, J.-L. Galzi, A. Devillers-Thiéry y yo, en colaboración con Bertrand. La clorpromazina se liga a varios de los aminoácidos del segmento M2, en particular a un anillo de leucinas. Este aminoácido hidrófobo no parecía atraer la atención de los fisiólogos. Nosotros, en cambio, decidimos sustituirlos por un aminoácido hidrófilo, la treomina.

La proteína expresada en el oocito de rana goza de propiedades sorprendentes. Ante todo, ya no se desensibiliza; además se hace sensible a concentraciones de acetilcolina extremadamente bajas, y el canal abierto por la acetilcolina es más conductor que el canal normal. Imaginemos



5. FUERZAS DIVERSAS que pueden condicionar la conformación del receptor del neutrotransmisor y su consiguiente rendimiento a la hora de responder a las señales que le envía la neurona. Amén de la concentración y tasa de liberación de neurotransmisor (*a*), intervienen la unión con otros neurotransmisores u otras sustancias químicas extracelulares (*b*), cambios en el potencial eléctrico a través de la membrana (*c*) y enlace con moléculas señalizadoras intracelulares, iones por ejemplo (*d*).

ahora por un momento que el anillo de leucinas bloquea la apertura del canal en el estado desensibilizado y que la mutación lo mantiene abierto. ¿Qué ocurrirá? La respuesta eléctrica registrada estará dominada por un nuevo tipo de canal, que no podrá desensibilizarse, puesto que ya se encuentra en el estado desensibilizado; después se abrirá por la acción de concentraciones bajas de acetilcolina, para las cuales la acetilcolina se liga sobre la proteína en ese mismo estado. Todo lo cual se ha comprobado. De acuerdo con este razonamiento, el curare debería tener un efecto paradójico: al estabilizar en el mutante el estado "desensibilizado abierto", debería comportarse como agonista. Y, en efecto, así sucede.

Parece entonces admisible la hipótesis de que el cierre del canal en el estado desensibilizado se debe al anillo de leucina, lo que significa que la molécula de receptor puede adoptar diversas conformaciones "alostéricas" que difieren entre sí, tanto por el modo de unión de los neurotransmisores y de sus homólogos farmacológicamente activos como por la manera en que se cierra —o se abre— el canal iónico.

Cabe preguntarse por el fundamento fisiológico de la propiedad que posee la molécula del receptor de efectuar transiciones lentas entre el estado activable —que transmite la señal— y el estado desensibilizado o "refractario", que no la transmite. La explicación inmediata sería la de una regulación de la "eficacia" de la sinapsis, en respuesta al mismo neuromediador. Una sobredosis de éste podría dejar pasar cantidades importantes de iones a través de la membrana celular, agotando el gradiente electroquímico y, por tanto, poniendo en peligro la célula: la desensibilización protege contra el exceso de neurotransmisor. Su intervención es efectiva en la placa motriz cuando la frecuencia de la estimulación es muy elevada, de 40 veces por segundo o más. Pero, según una hipótesis atractiva, que desarrollé con T. Heidmann en 1982, las transiciones lentas desempeñan un papel más general en la regulación de la eficacia de una sinapsis para transmitir una señal, concretamente en función del estado de actividad de las neuronas que conecta. Las transiciones alostéricas lentas de los receptores intervendrían en el "aprendizaje" sináptico.

La hipótesis es atrevida. En principio, los receptores de la acetilcolina, igual que los de otros neurotransmisores —GABA, glicina, glutamato— presentes en el sistema nervioso central, poseen la propiedad de desensibilizarse, aunque de manera variable. Ciertas combinaciones de subunidades, determinados efectores farmacológicos dan lugar a desensibilización, y otros en cambio no. Más importante aún es que son otras señales fisiológicas distintas de las del neuromediador las que regulan la velocidad y la amplitud de la desensibilización. Este es el caso, por ejemplo, del potencial de membrana o de los iones Ca^{++}: la hiperpolarización y la elevación de la concentración intracelular del Ca^{++} aceleran la desensibilización del receptor de acetilcolina en el músculo.

Como ya demostraron en 1986 Richard Huganir y Paul Greengard la fosforilación del receptor va en el mismo sentido. Esta fosforilación puede a su vez ser estimulada por un neuropéptido, como el péptido relacionado con el gen de la calcitonina, que coexiste con la acetilcolina en las terminaciones de los nervios motores. Se dan ahí todas las condiciones para que tenga lugar una regulación de la desensibilización por la actividad nerviosa.

Por último, se han observado también regulaciones en sentido opuesto: potenciaciones. En 1986, J. Johnson y Philippe Ascher encontraron una potenciación cruzada de uno de los receptores del neuromediador excitador, el glutamato, por otro neuromediador ordinariamente inhibidor, la glicina. Igualmente, los tranquilizantes derivados del benzodiazepam refuerzan el receptor del GABA, sin que conozcamos todavía con qué señal endógena están relacionados. En términos generales, si en la membrana de la neurona el receptor se encuentra espontáneamente en equilibrio entre dos conformaciones por lo menos, una activable y otra refractaria, serán señales químicas o incluso eléctricas las que regulen la eficacia de la respuesta del receptor desplazando el equilibrio entre estos estados en un sentido u otro, dando así lugar a una potenciación o a una depresión.

El hecho de que la molécula del receptor atraviese la membrana le confiere la posibilidad de reconocer señales producidas en el interior y en el exterior de la célula donde se halla. Se capacita así para "integrar" múltiples señales convergentes e incluso "leer" su coincidencia en el tiempo, en virtud de sus propiedades alostéricas. Diversas teorías sobre el aprendizaje postulan que, para que tal aprendizaje exista, la eficacia de la sinapsis debe cambiar cuando se da una coincidencia (o relación temporal definida) entre las actividades de las dos células que conecta. Los receptores-canales poseen las propiedades adecuadas para satisfacer tal exigencia. No ha podido establecerse todavía la relación entre estas propiedades elementales y un aprendizaje definido en el comportamiento, aunque el modelo se aplica a los ejemplos descritos por E. Kandel, de la Universidad de Columbia, con la aplisia, o por Masao Ito, de la Universidad de Tokio, con la célula de Purkinje del cerebelo. Sin embargo, la realidad tal vez no sea tan simple.

La elección del órgano eléctrico de un pez para aislar un receptor farmacológico constituía una apuesta no exenta de riesgos, pese a lo cual se ha ganado. Partiendo del órgano eléctrico se ha identificado y purificado el receptor de la acetilcolina, y descifrado su secuencia. La biotecnología, y en particular los métodos de la genética molecular, han permitido extender al receptor del músculo humano los conocimientos obtenidos con el del pez. Se abre, en fin, un campo nuevo con la caracterización de los receptores cerebrales para la nicotina, la glicina, el GABA, la serotonina, el glutamato. Y para cada especie de receptor se conocen varias subunidades, con sus distribuciones particulares en el cerebro. Pueden formarse múltiples combinaciones a partir de diversas subunidades, cada una con propiedades farmacológicas propias. Podemos ya dirigir la farmacología hacia un tipo concreto de receptor, presente en una categoría definida de neuronas, lo cual permite abrigar fundadas esperanzas de encontrar tratamientos más selectivos para las enfemedades mentales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A MOLECULAR VIEW OF NEUROTRANSMITTER-RECEPTORS AND IONIC CHANNEL, S. Numa, en *The Harvey Lectures*, n.º 83, páginas 121-165, 1989.

THE STRUCTUREOF ION CHANNELS IN MEMBRANESOF EXCITABLES CELLS, N. Unwin, en *Neuron*, vol. 3, págs. 665-676, 1989.

THE NICOTINIC ACETYLCHOLINE RECEPTOR, J. P. Changeux, en *Rita Levi Montalcini Award Lecture*, páginas 21-168, 1990.

EXPLORATION OF THE NICOTINIC ACETYLCHOLINE RECEPTOR, A. Karlin, en *The Harvey Lectures*, n.º 85, páginas 71-107, 1991.

FUNCTIONAL ARCHITECTURE OF THE NICOTINIC ACETYLCHOLINE RECEPTOR: FROM ELECTRIC ORGAN TO BRAIN, J. L. Galzi y *cols.*, en *Annual Review of Pharmacology*, n.º 31, páginas 37-72, 1991.

Perfiles

Rusell Ruthen

FREDERICK SANGER: *el descubrimiento de la secuencia oculta*

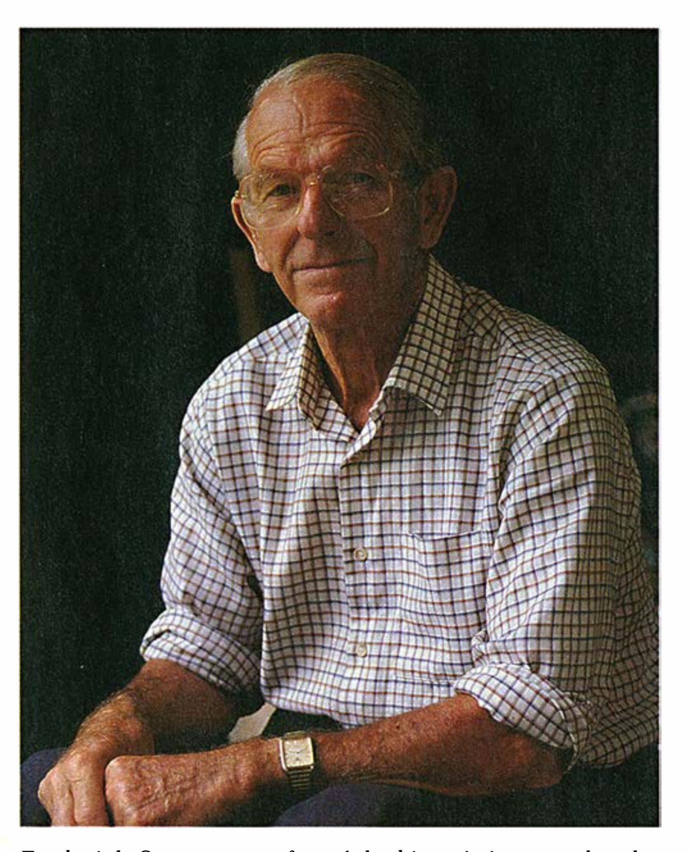
Cabría esperar que un ganador de dos premios Nobel sumase fondos para un laboratorio de renombre mundial, diese conferencias a rendidos admiradores y cobrase derechos de autor por una novela de éxito, y de esta manera pasase sus días. Pero Frederick Sanger no busca ni fama ni fortuna. El hombre que puso los cimientos de la bioquímica moderna lleva una vida apacible en Swaffham Bulbeck, donde cuida su jardín de narcisos y ciruelos. "Me parece que a Sanger no se le ha considerado tanto como a otros, y que en parte se debe a lo discreto que es", dice Alan R. Coulson, que colaboró con él durante 16 años en el laboratorio MRC de Biología Molecular, en Cambridge.

Hace cuarenta años, Sanger desentrañaba la primera estructura completa de una proteína. Luego, en los años setenta, elaboró una técnica para descifrar el código genético. "Se merece los dos premios Nobel", sostiene el bioquímico G. Nigel Godson, del hospital clínico de la Universidad de Nueva York. "Llevó a cabo él solo dos revoluciones en la biología." Además, dice con orgullo Coulson, ha sido Sanger quien ha sentado buena parte de las bases del Proyecto Genoma Humano.

Sanger domina el arte de no darse importancia, tanto en su porte como en su actuar; rehúye toda afectación. Nació en el seno de una familia acomodada. Su abuelo hizo una fortuna en el negocio del algodón, y la heredó su madre, Cicely. De pequeño, a Frederick le fascinaba la naturaleza, y recogía de todo, piedras, insectos. De mayor quería ser médico, como su padre, que también se llamaba Frederick. Mas aunque al joven Sanger le encantaba la ciencia de la medicina, no le interesaban ni diagnósticos ni curas.

Se mire como se mire, Sanger no fue un estudiante brillante. En 1936 fue aceptado en la Universidad de Cambridge; sin embargo, las ciencias básicas se le ponían cuesta arriba. Aprobó la química, pero "cateó" la física. "Nunca gané una beca", señala. "Si mis padres no hubieran sido ricos, no estoy seguro de que hubiera podido estudiar en Cambridge."

Sanger encontró su vocación a poco de entrar en la universidad. Un profesor entusiasta, Ernest Baldwin, le metió el gusanillo de la nueva ciencia de la bioquímica. A Sanger le gustó tanto la disciplina que siguió cursos avanzados durante un cuarto año adicional en Cambridge. Dice que dos semanas después de los exámenes finales "me quedé de piedra al ver que había obtenido calificaciones máximas".



Frederick Sanger transformó la bioquímica con la elaboración de métodos para determinar la estructura de las proteínas y el ADN

Estallada la Segunda Guerra Mundial, a diferencia de la mayoría de sus compañeros, no se alistó. "Fui educado como cuáquero, y sentía en lo más hondo que no se debe matar a otros por ninguna razón", explica. Consiguió defender su postura frente a un tribunal militar, y se pasó los años de la guerra cursando su doctorado. Obviamente, no eran muchos los estudiantes graduados libres durante la guerra, y el departamento de bioquímica aceptó de muy buena gana a aquel prometedor estudiante.

Tras obtener el grado de doctor en 1943, entró en el laboratorio del profesor A. C. Chibnall, de Cambridge, pionero de la química de las proteínas. Chibnall le pidió que estudiara la insulina, la hormona pancreática que regula el metabolismo del azúcar; así empezó un proyecto que duró diez años e hizo de Sanger el mayor experto de su campo. La insulina, como las demás proteínas, consta de diferentes aminoácidos. Ya se sabía por entonces que la química de las proteínas dependía de cómo se ordenaran éstos. El problema es que no había manera de deducir su secuencia.

Chibnall y Sanger escogieron la insulina por varias razones. Se podía obtener en forma pura, y era una molécula pequeña, al menos entre las proteínas. Y quizá lo más importante: si se llegaba a descifrar la estructura de la hormona se conocería el mecanismo de control del metabolismo del azúcar (lo que sirvió de mucho en medicina).

Para determinar la secuencia de la insulina, Sanger recurrió en un principio a una táctica sencilla que los químicos emplean para analizar macromoléculas: romperlas en fragmentos y averiguar después cómo encajan las piezas. Hacerlo no es tan fácil como decirlo. Para trocear la insulina en porciones que tuvieran un tamaño útil y para clasificarlas a continuación, probó todos los trucos del catón químico, y acabó por concebir algunos procedimientos nuevos.

Entre las innovaciones importantes de Sanger figura un método para etiquetar

un extremo de un fragmento de proteína. Esas marcas facilitaban la deducción de qué piezas iban juntas. Si, por ejemplo, tres aminoácidos (llamémosles A, B y C) estaban enlazados siguiendo cierto orden en una cadena, la secuencia podía determinarse como sigue: tras poner una etiqueta a cada cadena, se las fragmentaba en aminoácidos individuales, y se observaba, pongamos por caso, que era B el que estaba al final de la cadena; una nueva muestra de las mismas cadenas podía fragmentarse en trozos que constaran de dos aminoácidos; el paso final consistía en aislar todos los fragmentos que tuvieran un B en un extremo; si todos los B estaban enlazados con A, entonces la secuencia tenía que ser BAC.

Mientras andaba tras la secuencia de la insulina, ensayó cientos de técnicas diferentes. "La mayoría de los experimentos no funcionan", dice. "No le dedicaba mucho tiempo a averiguar cuál había sido el fallo. Me ponía a pensar en el siguiente experimento. Ello evitaba que me deprimiese."

Hay un experimento en particular que le gustaría olvidar. En 1947 entró en el laboratorio de Arne W. K. Tiselius, en Upsala, donde pasó un año. Una de las técnicas de Sanger parecía indicar que la insulina no constaba de una única cadena sino de cuatro cruzadas. Cuando le presentó los resultados a su mentor, Tiselius le propuso que escribieran un artículo juntos sin demora. "Me chocó bastante, pues él no había contribuido realmente en nada."

Pero, miembro novel del laboratorio, accedió. "Es el único artículo del que me avergüenzo", comenta. Sanger descubrió más tarde que la insulina consta en realidad de dos cadenas cruzadas, de 30 y 21 aminoácidos. La cadena larga era con mucho la estructura más compleja con la que había lidiado la química de las proteínas hasta entonces. En 1952 descifró por fin, con sus colegas Hans Tuppy y E. O. P. Thompson, la secuencia completa de ambas cadenas.

Quedaba por averiguar cómo se enlazan las cadenas para formar la molécula de insulina. El problema resultó ser de lo más complicado. Un primer análisis parecía indicar que las cadenas se enlazaban casi por todas partes. Cayó entonces en la cuenta de que las técnicas con que cortaba la molécula creaban puentes nuevos entre las hebras. En 1955 encontró una manera de impedir la introducción de enlaces cruzados, y consiguió establecer la estructura entera de la insulina.

Cuatro años más tarde, recibía el premio Nobel de química por sus investigaciones sobre la insulina. Enseguida le acosaron profesores que le invitaban a dar clases y administradores que buscaban su asesoría. Pero él no quiso entrar al trapo. "Me he empeñado en librarme tanto de la docencia como de las tareas administrativas. En parte porque me parecía que no servía ni para una cosa ni para la otra, pero también por egoísmo."

Por ironía de las cosas, la investigación de Sanger comenzó a decaer el mismo año en que recibió el Nobel. Había llevado el estudio de la insulina tan lejos como había podido, y buscaba nuevas cuestiones a las que hincarles el diente. "Pienso que hay períodos así en la carrera de casi todos los investigadores; pueden ser deprimentes, y a veces llevan a la desilusión", observa. "El mejor remedio es seguir mirando hacia delante."

En 1961 Sanger se trasladó al Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge, y contrató a Coulson como investigador ayudante. "No es de esa clase de personas con las que enseguida se compadrea", dice Coulson.

El talento de Sanger para resolver oportunamente el problema que convenía abordar le ha reportado dos premios Nobel de química.

Poco después de llegar al laboratorio, Sanger pensó que sus conocimientos podían ser útiles para analizar el ADN, la molécula que almacena el código genético. En el decenio anterior James Watson y Francis Crick habían llegado a la conclusión de que el ADN es una larga hélice doble hecha con cuatro nucleótidos diferentes. La disposición de los nucleótidos determina las proteínas que el organismo puede sintetizar, esto es, qué genes va a expresar. Pero por entonces los científicos sólo podían determinar la secuencia de nucleótidos de secciones muy pequeñas de una cadena de ADN.

Sanger se marcó una meta ambiciosa: hallar la secuencia de los miles de nucleótidos de un virus. Mas tanto él como otros bioquímicos se dieron cuenta pronto de que era más difícil analizar el ADN que las proteínas, por dos razones. Primera, porque tenían menos experiencia en manejar aquél que éstas. Segunda, porque el ADN está formado por sólo cuatro piezas básicas, mientras que las proteínas lo están por una veintena de aminoácidos. Pasa como con los rompecabezas, que si tienen muchas piezas parecidas son más difíciles de resolver que si constan de muchas piezas distintas: así, la secuencia del ADN era mucho más difícil de descifrar que la de la insulina.

Durante más de diez años investigó técnicas para secuenciar el ADN, en competencia con laboratorios de todo el mundo. En 1975 Sanger y Walter Gilbert, de la Universidad de Harvard, independientemente el uno del otro, elaboraron métodos con los que era posible una rápida secuenciación; gracias a ello se podía determinar la secuencia de nucleótidos de segmentos cuya longitud fuese de 200 unidades o más en pocos días. Con los métodos habituales se hubiera tardado años. Gracias a la nueva técnica Sanger y sus colaboradores determinaron los 5327 nucleótidos del virus ΦX174.

En 1980 ganó un segundo premio Nobel, compartido con Gilbert y Paul Berg, de la Universidad de Stanford. Berg había encontrado la manera de insertar trozos de ADN de un organismo en el de otro. Su trabajo abrió las puertas a la técnica del ADN recombinante.

Durante su carrera ha publicado del orden de un artículo científico importante cada ocho años, pero sus colegas dicen que todos ellos son clásicos de la bioquímica experimental. "No publico artículos a no ser que tenga algo que decir y que esté seguro de lo que voy a decir", explica.

Aunque todavía asesora a los miembros del Laboratorio de Biología Molecular, vive ya retirado de la investigación. "El envejecimiento no mejoraba mi rendimiento en el laboratorio", lamenta. "Me sentiría culpable de ocupar un banco que pertenece a un joven."

Al reflexionar sobre su trabajo, le resulta difícil recordar momentos de gran inspiración. No se adhiere a "la idea vulgar de que el progreso científico se hace mediante adelantos repentinos". Piensa, por el contrario, en muchos momentos "asociados a avances pequeños y graduales".

Su casa, carente de toda ostentación, está rodeada por un bien cuidado jardín. Al parecer se dedica a la jardinería con el mismo empeño con el que antes investigara. Junto con su esposa Joan, de 52 años, cría pollos y cultiva una docena de variedades de flores y varios frutales. Cuando no trabajan en el jardín, disfrutan de la compañía de sus tres hijos, de sus nietos y de sus amigos. "Mi vida ha sido siempre feliz y pacífica", dice. El secreto es "trabajar en algo adecuado en el momento oportuno".

Ciencia y sociedad

Arqueología e informática

Pompeya como ejemplo

Con la generalización del uso de los ordenadores personales, comienzan los primeros tanteos experimentales de la aplicación de la informática a la arqueología. Se pretende sacar el máximo partido, que la nueva técnica ofrece, de los innumerables datos aportados por las excavaciones y buscar entre los mismos posibles correlaciones, contradicciones o superposiciones, se trate de documentación figurativa (fichas de unidades estratigráficas, fotografías y croquis) o de objetos materiales (cerámicas, útiles y otros).

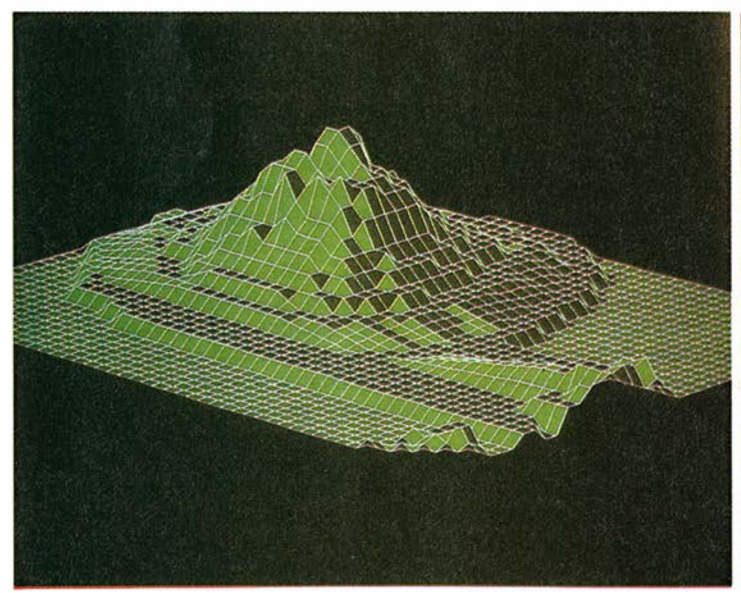
El recurso a la combinatoria o a la estadística permite obviar la parcialidad de las clasificaciones elaboradas en el pasado según criterios no homogéneos. La aplicación de la nueva herramienta ayuda a resolver, entre otros, dos grandes problemas: por un lado, la estructura multidimensional de los fenómenos históricos, que pueden así analizarse desde la perspectiva de las diversas disciplinas, y, por otro, facilita la comprensión de los hallazgos de la arqueología. El tratamiento integrado de imágenes, textos, gráficas, animación, sonido y simulación se convierte en un medio especialmente atractivo y eficaz para museos, exposiciones y parques arqueológicos.

Gracias a la introducción de los procesos informáticos, la arqueología ha avanzado bastante en el conocimiento de la topografía y el paisaje urbano de los núcleos antiguos. Pero también se han visto beneficiados otros aspectos más escurridizos, como el descubrimiento de la sutil red de relaciones que, encerradas en los datos, nos explican el contexto social, cultural, político y religioso del momento.

Un buen ejemplo de cuanto venimos diciendo lo constituye el Proyecto Neápolis, aplicado desde el año 1986 a la ciudad de Pompeya y sus alrededores. Bajo el patrocinio de IBM Italia y la FIAT Engineering, los resultados obtenidos hasta el momento forman parte de una gran exposición que, con el título de *Redescubrimiento de Pompeya,* se ha exhibido en Nueva York y Amsterdam. En la primera fase del proyecto trabajaron más de cien especialistas entre arquitectos, arqueólogos, historiadores del arte y técnicos en informática, adscritos en buena parte a las universidades de Nápoles y Roma.

Creada una detallada base de datos geográfica, los mapas permitieron al equipo investigador confeccionar una estructura tridimensional en la que inscribir la información pertinente sobre la zona, lo que ha supuesto barajar múltiples entradas relativas a la ciudad: 12.000 entradas sobre objetos individuales, 8700 imágenes digitales en color de los frescos y objetos y más de 22.000 fichas de excavación que incluían imágenes de 7000 páginas de los diarios de excavación. Pero, además, se ha reconstruido la historia del Vesubio a través del estudio de los materiales depositados en sus erupciones a fin de valorar sus riesgos potenciales; se sabe, así, que la próxima erupción será de intensidad media, la mayor desde la de 1631, aunque sólo hay un 10 por ciento de posibilidades de que el viento lleve de nuevo las cenizas sobre Pompeya.

Ante la imposibilidad actual de un estudio global informatizado de todo el patrimonio mueble e inmueble de un yacimiento que lleva quinientos años de estudios y excavaciones, se ha optado por aplicar las técnicas informáticas a los materiales que corrían mayor peligro, es decir, las pinturas y los mosaicos, cuya reconstrucción electrónica es la fase siguiente a su tratamiento por ordenador. Al espectador de la exposición se le ofre-





La informática está revolucionando la arqueología. A la izquierda se ofrece un modelo topográfico del cráter del Vesubio. Estos modelos del área arqueológica de los alrededores de Pompeya han proporcionado valiosa información para la planificación actual de la red viaria, las canalizaciones hidráulicas o la prevención frente a desastres naturales. A la derecha, se ilustra la aplicación de técnicas electrónicas de reconstrucción de imágenes a la restauración de una pared al fresco de la casa VI, 17, en la ínsula occidental

cen las claves para la lectura de la pintura pompeyana, desde la naturaleza de los pigmentos empleados hasta la explicación formal del significado de las representaciones, algunas de éstas tan complejas y difíciles como las del ritual dionisíaco de la Villa de los Misterios.

Con el concurso de la fotoplanimetría se ha reconstruido el área del Vesubio y de la antigua Pompeya, para situar adecuadamente las pinturas y los mosaicos de cada uno de los barrios, *insulae* (manzanas de casas) y paredes o vanos de las casas. Esa técnica permite, además, abordar con mayor precisión la red viaria y la morfología del relieve en la antigüedad, es decir, cómo era Pompeya en el momento de la erupción. (El Proyecto ha servido también para planificar el futuro de la zona en lo concerniente al abastecimiento de agua y el trazado carreteras.)

La vida política, social, cultural, profesional y económica de Pompeya, y en general de las comunidades vesubianas (Herculano, Stabia, Oplontis), en el siglo primero antes de Cristo, se recoge en gráficas y cuadros estadísticos. Se han ubicado los edificios de culto de la ciudad para saber su intensidad y frecuencia así como los edificios públicos, como la basílica, sede de la actividad judicial, a fin de establecer la exacta relación entre arquitectura pública civil y arquitectura pública sacra. Lo mismo se ha realizado con los edificios comerciales, diferenciándolos por sus actividades, como las tabernas, tiendas de venta de comida y bebida, y con los prostíbulos y edificios industriales, fueran de preparación del *garum* (conserva de pescado) o dedicados a la producción textil. Todo ello, de obvio interés por sí mismo, presenta la importancia añadida de la comparación con otras ciudades y otros momentos históricos.

Sin embargo, pese a los casi treinta años que arqueología e informática llevan trabajando juntas, no podemos ofrecer todavía una visión risueña de ese maridaje. Muchas veces, la documentación a la que se enfrenta el arqueólogo es tan fragmentaria y, a veces, de interpretación tan controvertida que parece que el uso de la informática no tendría sentido; tal sería el caso, por ejemplo, de la clasificación de muchas monedas antiguas, dudosa por la identificación del tipo que lleva acuñado o por la fecha de su emisión y que depende de la libre capacidad interpretativa del catalogador.

Por ello, a los elementos usuales adoptados internacionalmente para la identificación de una moneda (tipo, leyenda, peso y posición de los cuños, ceca y autoridad emisora, procedencia y tipo de contexto) o sea, a los datos descriptivos, o, en términos informáticos, alfanuméricos, deberían ir orgánicamente acompañados de un archivo de imágenes, lo que explica que el uso del ordenador para catalogación en numismática haya sido muy reducido. Aunque la reciente utilización de discos ópticos de 800 kilobytes como soporte para la memorización de las imágenes podría cambiar muy pronto el panorama.

Pero hay otro campo dentro de la arqueología en el que el ordenador puede desempeñar un gran papel. Se trata del ámbito de la realidad virtual. Este medio se utiliza en arqueología para prefigurar soluciones de cubiertas de edificios, de pavimentaciones y suelos, de restauraciones pictóricas y, en general, en todos aquellos casos en los que una intervención directa sobre el material arqueológico parece poco clara, ahorrando de esta forma medios, trabajo y riesgo. La simulación es particularmente indicada en el campo de la restauración pictórica, en la que pigmentos y soporte son tan frágiles que no resisten una excesiva experimentación de las distintas técnicas de restauración. Sólo cuando se han realizado todas las comprobaciones en el computador puede pasarse a la intervención directa sobre el monumento.

No menos interesantes son las posibilidades que la realidad virtual ofrece en el campo de la arquitectura. Dentro del Proyecto Neápolis, podemos experimentar con un edificio, las termas de Stabia: rotación y despliegue de la estructura, incorporación de las partes destruidas, pero, sobre todo, entrar en el edificio, verlo desde dentro, captar sus volúmenes. Los investigadores pueden también ensayar distintas hipótesis sobre las técnicas de construcción comparando los modelos informáticos con los restos de estructuras que la excavación ha proporcionado.

En este campo de la realidad virtual, el futuro inmediato, según los indicios, puede ser sorprendente. En el reciente festival Immagina 93, celebrado en Montecarlo el pasado mes de febrero, la multinacional IBM presentó su restauración con imágenes informatizadas de la desaparecida abadía de Cluny. Las aplicaciones prácticas de la realidad virtual y el ciberespacio en arqueología permitirán crear parques arqueológicos en los que podamos sentirnos verdaderamente transportados a cualquier época del pasado. (*Anna Pujol i Puigvehí*)

Tolerancia inmunitaria

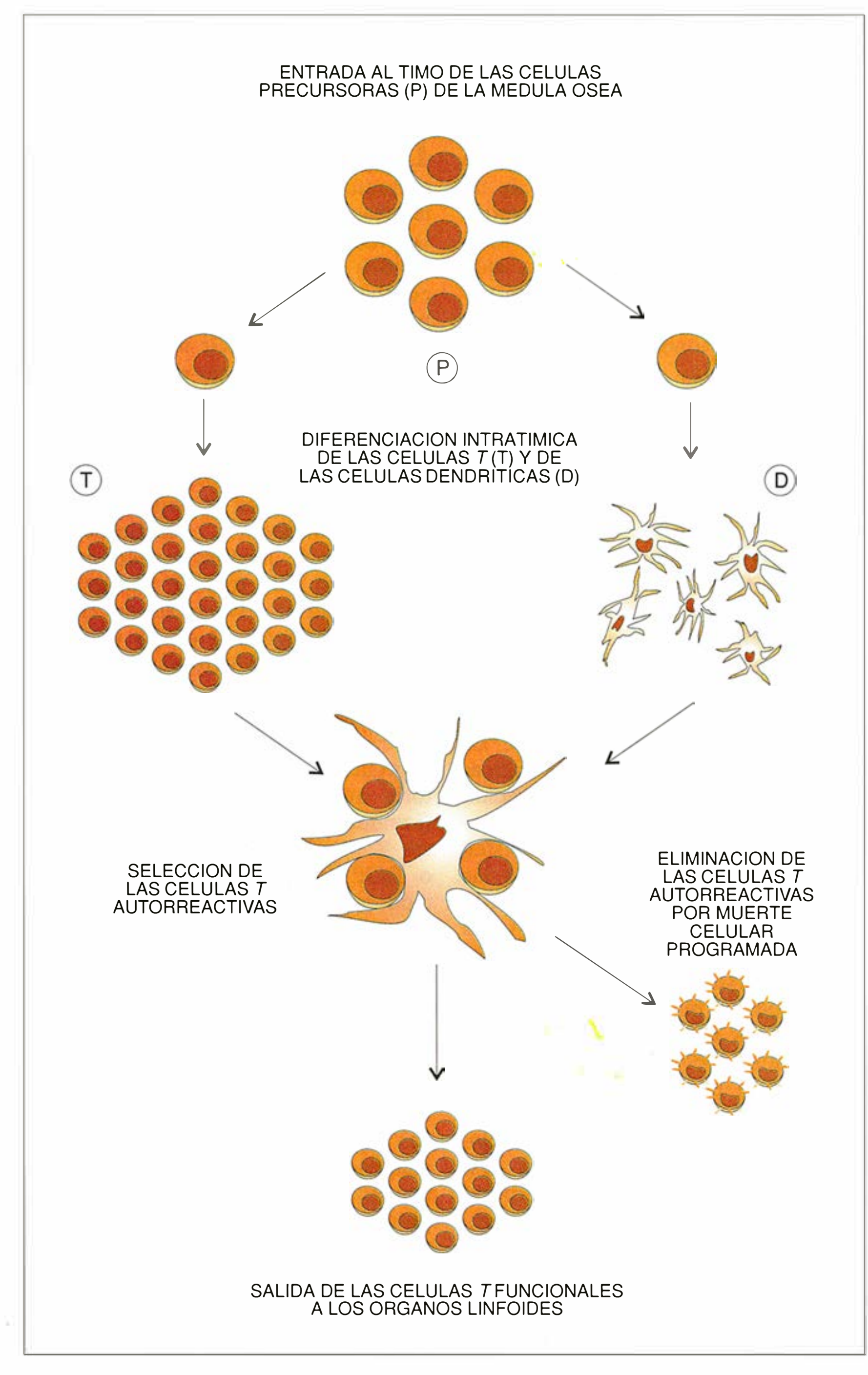
Células dendríticas del timo

Los mecanismos de defensa de los que dispone el organismo para enfrentarse a infecciones víricas, bacterianas o parasitarias, o para combatir la proliferación de células tumorales, residen en el potencial de un tipo de células sanguíneas, los linfocitos, para reconocer estructuras moleculares extrañas, es decir no propias (antígenos extraños o no-propios), y distinguirlas de las moléculas propias (antígenos propios). Este fenómeno se basa en la existencia de un extenso repertorio de receptores antigénicos localizados en la superficie celular, que confieren a cada linfocito la capacidad de reconocimiento específico de un solo tipo de antígeno.

La enorme diversidad de especificidades antigénicas de las poblaciones celulares linfocitarias se genera como resultado de un mecanismo complejo de reordenación de los genes que determinan las cadenas polipeptídicas que componen los receptores antigénicos de los linfocitos *B* (inmunoglobulinas) o de los linfocitos *T* ("receptores de las células *T*", o RCT). Este proceso de reordenación ocurre durante la diferenciación de los linfocitos *B* en la médula ósea, y de los linfocitos *T*, cuyo origen es el timo.

Debido a que la reordenación de los genes de las inmunoglobulinas y de los RCT tiene lugar al azar, las cadenas polipeptídicas resultantes conforman no sólo receptores antigénicos capaces de unirse eficazmente a un antígeno extraño, y combatir por tanto una infección vírica o bacteriana o un proceso canceroso, sino también receptores que pueden reconocer con alta afinidad estructuras moleculares propias del organismo. Como consecuencia, se generan linfocitos autorreactivos con capacidad potencial para desencadenar una respuesta inmunitaria contra antígenos propios, que en determinadas circunstancias podría generar una enfermedad autoinmune; ocurre así en la esclerosis múltiple y la artritis reumatoide, condiciones en las que los linfocitos del propio paciente reconocen como extraños la *proteína mielínica básica* (PMB) y el colágeno tipo II, respectivamente.

Sin embargo, el organismo posee mecanismos responsables de la inactivación o eliminación de los linfocitos autorreactivos, es decir, capaces de inducir un estado de tolerancia hacia los antígenos propios. Unicamente en el caso de que las células autorreactivas escapen a esos siste-



Proceso de selección de las células dendríticas en el timo

mas de control se desarrollará una enfermedad autoinmune.

En los últimos años se ha llevado a cabo un gran esfuerzo para comprender el proceso de generación de tolerancia, y esta labor de investigación ha dado lugar a importantes resultados, particularmente en lo que concierne a los mecanismos de control de los linfocitos *T* (células *T*) autorreactivos. Estos se basan, sobre todo, en la eliminación de los clones de células *T* durante su diferenciación, por un proceso de selección que requiere la confrontación entre los RCT de las células *T* y las moléculas codificadas por el *complejo principal de histocompatibilidad* (MHC) presentes en la superficie de células estromáticas especializadas del timo. Distintas aproximaciones experimentales —como el estudio de la reconstitución tímica en ratones irradiados o inmunodeficientes, o el desarrollo de *ratones transgénicos*— han demostrado que las principales células estromáticas responsables de la inducción de tolerancia intratímica de las células *T* son las células dendríticas del timo.

Las células dendríticas derivadas de la médula ósea, que se localizan en el timo y en las áreas *T* de los órganos linfoides periféricos —como el bazo o los ganglios linfáticos—, donde reciben el nombre de *células interdigitantes*, y en diversos tejidos epiteliales, donde son denominadas *células de Langerhans*. Las células dendríticas periféricas están especializadas en la presentación antigénica y la activación de las células *T* maduras; sin embargo, su función en el timo tiene que ver con la inactivación de los clones *T* autorreactivos.

El proceso de selección que realizan las células dendríticas en el timo implica la presentación de péptidos derivados de antígenos propios o no propios, en el contexto de moléculas MHC, a las células *T* en el curso de su diferenciación intratímica. Las células *T* cuyos RCT reconocen péptidos propios o no propios con desmesurada afinidad, reciben de las células dendríticas una señal de inducción de *muerte celular por apoptosis* (muerte celular programada) que determina, por tanto, la *selección negativa* de los clones *T* autorreactivos.

La investigación reciente se ha concentrado en el estudio de la señalización celular durante la selección negativa, pero escasean los datos sobre la diversidad y la naturaleza de los antígenos hacia los cuales se induce la tolerancia intratímica. En efecto, aunque muchos admiten que, durante la diferenciación intratímica, se elimina una gran variedad de clones *T* cuyos RCT reconocen moléculas o antígenos propios como los presentes en la superficie de distintos tipos celulares, o como los componentes de la matriz extracelular o las proteínas séricas, tan sólo se ha descrito la deleción intratímica de un número reducido de clones *T*: en particular, clones *T* anti-moléculas MHC, anti-superantígenos bacterianos o de tipo Ml, anti-antígeno H-Y, anti-VCML (*virus de la coriomeningitis linfocítica*) y anti-hemoglobina.

Si bien el análisis del repertorio de las células *T* autorreactivas eliminadas en el timo es sumamente difícil, pues requeriría el desarrollo de ratones transgénicos con RCT específicos para cada antígeno posible considerado, el estudio del origen de las células dendríticas del timo reviste particular interés a la hora de conocer el potencial de deleción clonal de estas células. En efecto, tradicionalmente se ha considerado que las células dendríticas tímicas tienen un origen extratímico y emigran de los órganos linfoides periféricos al timo convertidas en células maduras y funcionales.

De acuerdo con esta hipótesis, y

teniendo en cuenta la función primordial de las células dendríticas periféricas como células captadoras, procesadoras y presentadoras de antígenos, éstas podrían transportar en el curso de su migración al timo, y consiguientemente presentar a las células *T* en curso de diferenciación, además de antígenos propios intra- y extratímicos, antígenos exógenos extraños (derivados de virus, bacterias o parásitos). En virtud de ello, los clones *T* específicos correspondientes podrían ser eliminados, induciéndose no sólo un estado de tolerancia hacia los antígenos propios, sino también hacia los antígenos exógenos, de lo cual resultaría una incapacidad transitoria de defensa contra éstos y, por tanto, el desarrollo de un proceso patológico.

Sin embargo, los estudios llevados a cabo por Ken Shortman y el autor en el Instituto Walter and Eliza Hall de Melbourne, sobre el origen de las células dendríticas del timo de ratón, utilizando sistemas de reconstitución tímica tras irradiación, han demostrado que estas células se originan en una población intratímica de precursores con capacidad de formación tanto de células *T*, como de células dendríticas.

Estos datos sugieren, por un lado, que existe una estrecha relación entre ambos linajes celulares, de acuerdo con estudios anteriores que habían demostrado que las células dendríticas expresan moléculas de membrana consideradas marcadores de células *T*. Por otro, implican que el potencial de deleción de clones *T* de las células dendríticas tímicas está limitado a su capacidad de presentación de antígenos, principalmente propios, presentes en el seno del microambiente tímico. Puesto que el acceso al parénquima tímico de antígenos extratímicos está restringido por la barrera hemato-tímica, debe haber otros mecanismos periféricos de tolerancia que garanticen la inactivación de las células *T* autorreactivas cuyos RCT reconocen antígenos propios extratímicos, y que podrían ocasionar lesiones autoinmunitarias.

El reciente descubrimiento de diferentes subpoblaciones de células dendríticas en el timo —que pueden ser aisladas por su expresión diferencial de moléculas de membrana específicas— respaldan la esperanza de que en un futuro más o menos cercano lleguemos a desentrañar los mecanismos implicados en la transmisión de las señales responsables de la *selección negativa* de las células *T* autorreactivas, lo que abrirá el camino para métodos terapéuticos más eficaces en el tratamiento de las enfermedades autoinmunitarias. (*Carlos Ardavín, de la Universidad Complutense.*)

Dilema del preso

Nunca des a un pardillo un trato equitativo

Los estudiosos del comportamiento han dedicado grandes esfuerzos a analizar si la evolución favorecería a los individuos cooperadores o a los expoliadores que buscan ganancias a corto plazo. Un torneo computarizado llevado a cabo hace más de diez años indicaba que una estrategia de conducta cooperativa conocida por "Toma y daca" (tit-for-tat) logra vencer y expulsar a los explotadores. Pero Toma y daca resulta no ser estable en situaciones más cercanas a las que se dan en la vida real. Una serie de modelizaciones computarizadas recientemente efectuadas han revelado una fórmula más robusta, denominada "Pavlov", capaz de prevalecer sobre Toma y daca en la carrera evolutiva, conservando la tendencia a la cooperación de ésta... hasta cierto punto. Sus descubridores opinan que Pavlov podría ser modelo de muchos ejemplos de altruismo en el mundo natural.

La piedra de toque, el paradigma para el análisis de la evolución de la cooperación, es una situación paradójica conocida por "dilema del preso". En este problema se tienen dos presuntos delincuentes, detenidos e incomunicados, cada uno de los cuales considera si le conviene confesar a cambio de una condena clemente (cooperación) o acusar al otro del delito (traición o defección). El pago que recibe cada jugador depende de lo que haga el otro. Si ambos cooperan, cada uno sale mejor librado que si ambos, tratando de explotar al otro, traicionan. Sin embargo, a cada uno de ellos, por separado, la defección le resultaría más ventajosa que la cooperación [*véase la tabla*].

Aunque la defección siempre resulta rentable en partidas a un envite, las estrategias cooperativas podrían resultar ventajosas si el dilema del preso se da repetidamente, como suele ocurrir en las interacciones entre los miembros de una comunidad. Cuando Robert Axelrod, profesor de ciencias políticas de la Universidad de Michigan, organizó a principios del decenio pasado un torneo de programas informáticos para jugar al dilema del preso, la estrategia vencedora fue, sorprendentemente, la llamada Toma y daca. Toma y daca causó sorpresa por su gran simplicidad: empieza cooperando y en las sucesivas rondas se limita a repetir lo que haya hecho su oponente en la jugada anterior.

Martin Nowak y Karl Sigmund demostraron hace dos años que Toma y daca no es robusta en simulaciones donde, como ocurre en el mundo real, se produzcan ocasionalmente errores por azar, pues, según descubrieron, acaba enzarzada en ronda tras ronda de mutua represalia. Recientemente, Nowak y Sigmund han realizado simulaciones que modelizan también los efectos de las mutaciones en las estrategias, vale decir, de los pequeños cambios en ellas. Los resultados, publicados en *Nature*, eran punto por punto tan pasmosos como los deducidos de los torneos de Axelrod.

Nowak y Sigmund descubrieron que en una amplia variedad de situaciones, si esperaban lo suficiente, la estrategia que denominan Pavlov solía acabar dominando en las poblaciones por ellos modelizadas. En la estrategia Pavlov se coopera tras cada confrontación en la que cooperen o defrauden ambas partes. Sin embargo, si en la ronda anterior sólo cooperó un jugador, Pavlov traiciona. A la estrategia se le da este nombre porque repite, a modo de un reflejo condicionado, su jugada anterior si recibe uno de los dos pagos más altos y cambia si queda detrás.

Una población de individuos pavlovianos coopera y cosecha los beneficios que la cooperación reporta. Pero una población pavloviana no tiene tendencia a iniciar indiscriminadamente la cooperación. El punto flaco de Toma y daca es, según Nowak y Sigmund, que la mutación permite que las poblaciones se tornen cada vez más cooperativas, lo que las lleva finalmente a ser invadidas por estrategias egoístas que practiquen la explotación sistemática.

Nowak y Sigmund hacen notar que los seres vivos suelen tomar represalias ante la defección. Se ha enten-



PAGO AL PRIMERO \ PAGO AL SEGUNDO		SEGUNDO JUGADOR: COOPERA	SEGUNDO JUGADOR: DEFRAUDA
PRIMER JUGADOR	COOPERA	3 / 3	0 / 5
PRIMER JUGADOR	DEFRAUDA	5 / 0	1 / 1

*El dilema del preso nace del beneficio (número de puntos) que logra cada jugador según coopere o traicione. En simulaciones elaboradas, la estrategia llamada Pavlov (*en verde y amarillo*) suele acabar predominando*

dido que estos hallazgos respaldan la idea de que la vida se atiene a una estrategia de toma y daca. Pero esos mismos resultados respaldan también la hipótesis de que su estrategia sea similar a Pavlov, la cual, aunque cooperante con otros que cooperan, "no tiene reparos en explotar a los pardillos". *(Tim Beardsley)*

Siglo XXI

La Europa de los investigadores

La Comunidad Europea (CE) está llevando a cabo, desde hace casi diez años, una acción estructurada en todas las actividades científicas y técnicas. Los programas que genera dicha acción forman parte indisociable del panorama científico europeo, de cuya profunda transformación aquéllos son importantes responsables. Se han establecido redes que vinculan laboratorios universitarios, institutos públicos de investigación y empresas, grandes y pequeñas. Se han anudado lazos —casi siempre irreversibles— y adquirido hábitos de cooperación que saltan por encima de las fronteras. Pero el que la Europa de la investigación constituya hoy una realidad no significa que hayan desaparecido todos los escollos ni que se hayan superado todas las carencias que padece el sistema europeo de investigación.

Aunque en un grado que varía con los países y en un promedio bastante alto, Europa sigue, pues, tropezando con dificultades en su afán por traducir sus descubrimientos y éxitos técnicos en logros económicos y comerciales. Sobre todo, se resiente de la fragmentación de los esfuerzos. No se puede afirmar todavía que exista una política común de investigación europea. La acción de la Comunidad representa sólo alrededor del 4 % de los costes de investigación europeos, pues sigue siendo muy débil la coordinación de la acciones acometidas en el marco de los programas nacionales y los programas comunitarios con los diversos organismos de cooperación científica como el CERN, la ESA y el EMBO.

Las actividades científicas de la CE se agrupan en conjuntos estructurales denominados programas-marco. La Comisión acaba de proponer para los años 1994-1998 uno nuevo y ambicioso, concebido para resolver los problemas mencionados. Así, para aumentar la eficacia de los programas de cada sector, los esfuerzos deben concentrarse en una serie de tecnologías "genéricas", aptas para múltiples aplicaciones; deberá hacerse especial hincapié en promover la difusión y aprovechamiento de los resultados de la investigación. Por otro lado, se hará un esfuerzo por coordinar mejor las actividades que se desarrollan, en la CE, en torno a una serie de grandes temas dentro de varios marcos de acción. El Centro Común de Investigación, institución comunitaria, podría desempeñar en ese sentido un papel importante.

Los programas implicados en los cuatro programas-marco sólo podrán ofrecer los resultados que se espera de ellos si, desde su concepción, permanecen estrechamente ligados a la comunidad científica. Vinculación que no se consigue de entrada, pues conforme se va desarrollando, el sistema comunitario de investigación corre el riesgo de alejarse del mundo de los investigadores. Para asegurarse de que las acciones previstas están rigurosamente concebidas, corresponden a necesidades auténticas y son realizables, se hace indispensable el asesoramiento permanente de los mejores representantes de la comunidad científica.



Antonio Ruberti, autor de esta nota y especialista en innovación tecnológica, ha sido profesor de la Escuela de Ingenieros de la Sapienza de Roma

Por esa razón, me ha parecido oportuno recabar la ayuda de François Gros, Ilya Prigogine y Carlo Rubbia en función de asesores. Gros será responsable principal de un determinado dominio, en tanto que los otros dos se encargarán de sendas dimensiones del trabajo científico.

Un lugar destacado para las biociencias

Gros asesorará a la Comisión sobre biociencias y biotecnología. Todo el mundo sabe que se trata de un campo donde los conocimientos avanzan a un ritmo espectacular. Cuarenta años después del descubrimiento por James Watson y Francis Crick de la estructura del ADN, no pasa un solo mes sin que haya un descubrimiento importante en el ámbito de la biología molecular. Por su parte, las neurociencias, en plena efervescencia, se nos ofrecen como el sector de desarrollo más prometedor en los próximos veinte años.

Pero las biociencias y la biotecnología no se limitan a ser la "nueva frontera" del conocimiento. Sus aplicaciones potenciales en medicina, agricultura e industria abren múltiples perspectivas para mejorar la calidad de vida y crear nuevos productos. Las biociencias se hallan en el meollo de los grandes retos que habrá de resolver el siglo venidero: retos alimentarios, energéticos, ambientales, de lucha contra las enfermedades de mayor incidencia y otros. El programa-marco proyectado reserva a esta estrategia un lugar preeminente, compartido con las tecnologías de la información e industriales.

Conforme se progrese en el conocimiento y en las técnicas de ese dominio se habrán de plantear, además, problemas, a menudo complejos, de orden ético y social, cuya solución entrañará delicados arbitrajes, redacción de códigos de conducta y elaboración de un marco reglamentario que gobierne la actividad científica.

Para reaccionar con celeridad en ese doble plano de la evolución de las técnicas y de las necesidades, y pergeñar a tiempo las acciones oportunas, la Comisión habrá de contar, aquí más que en otros casos quizá, con personas que se hallen en la vanguardia del saber.

Estrechar lazos con el mundo real de la ciencia

Se le ha encargado a Ilya Prigogine un informe sobre el modo más eficaz de reforzar los lazos de la CE con el mundo real de la ciencia. La calidad de la investigación comienza por los investigadores. Por encima de las instituciones, las partidas presupuestarias y la dotación de los laboratorios, la auténtica riqueza del sistema europeo de la ciencia yace en sus propios investigadores. Es menester que ese capital se desarrolle y se le saque el máximo partido en las mejores condiciones. Igual que otras zonas del mundo industrial, Europa habrá de enfrentarse en los próximos años con una escasez creciente de investigadores y técnicos en una sociedad que envejece. Deben tomarse, pues, medidas urgentes para devolverle al científico profesional el atractivo que ha perdido en parte y





Asesores de la Comisión de la Comunidad Europea para la Ciencia, la Investigación y el Desarrollo: François Gros (izquierda) *es biólogo celular y Secretario de la Academia de Ciencias de Francia; Ilya Prigogine* (centro), *profesor emérito de la Universidad Libre de Bruselas, recibió en 1977 el Nobel de química; Carlo Rubbia* (derecha), *ganador de un Nobel de física, ha desarrollado buena parte de su labor investigadora en el CERN*

garantizarle la posibilidad de un reciclaje permanente de sus conocimientos.

Junto a ese problema de índole general, la comunidad científica europea tendrá que habérselas con otro específico, el de su fragmentación en entes nacionales con escasa relación exterior. En numerosos casos, el joven científico comprobará que el laboratorio o centro de excelencia donde mejor podría formarse está en otro país. Para estimular la creación de una auténtica "Europa de los investigadores", la Comisión ha emprendido los programas "Ciencia" y "Capital humano"; deberán reforzarse esas iniciativas y adaptarse su operatividad a los hábitos de los investigadores.

Cada país posee sus propias instituciones, que desempeñan sin duda un papel importante: academias nacionales, colegios profesionales y ateneos. Varias entidades de ese rango existen a escala europea, y así la Comunidad podría establecer un flujo de relación más estrecho y continuo con las mismas. Sin olvidarnos del estudio y resolución de problemas que pudieran haber quedado relegados, como el estatuto social del investigador europeo.

En este contexto, hay un punto de particular relieve. Me refiero al mantenimiento activo de las comunidades científicas de los países de Europa Central y Oriental y a sus relaciones con las de Occidente. En cierto modo y como consecuencia del aislamiento que han sufrido durante mucho tiempo los investigadores de los regímenes socialistas, se han creado y mantenido en esas regiones tradiciones y escuelas originales y valiosas que hemos de salvaguardar a toda costa. Pero existe un riesgo claro en las acciones mal diseñadas o ejecutadas con precipitación, peligro que no es otro que el de la fuga de cerebros y el desmantelamiento de esas comunidades.

Papel de la ciencia europea en la investigación mundial

Compete a Carlo Rubbia asesorar en cuestiones que guardan relación con la internacionalización de los investigadores y la mundialización de los proyectos de largo alcance. La ciencia es, por naturaleza, una empresa internacional. Trascendiendo la mera cooperación tradicional, se han ido multiplicando, a lo largo de los últimos años, grandes proyectos cuya ejecución requiere una colaboración internacional, cuando no mundial. Un país u otro se encarga de la dirección del proyecto y, a tenor del coste y escala del mismo, de la realización; ocurre así con la investigación en fusión nuclear, infraestructuras espaciales y aceleradores de partículas, de carísima financiación, con el desciframiento del código genético, muy complejo, y con el cambio global del clima, de escala planetaria.

Ante ello, Europa debe actuar de forma concertada. La conjunción conseguida en la investigación sobre fusión nuclear por confinamiento magnético ha cedido a Europa el papel protagonista en ese dominio y le permite participar provechosamente en el proyecto ITER del reactor experimental internacional. La existencia de la ESA y del CERN le han conferido los medios para afirmarse como gran potencia espacial y situarse en la cúspide de la física de las altas energías, con capacidad de diálogo coherente en ambos terrenos con el resto del mundo. El estado de las cosas cambia, sin embargo, cuando no se dispone de grandes instalaciones compartidas necesarias para acometer programas internacionales de estudio del clima, la atmósfera, los océanos, etcétera. Uno de los objetivos esenciales que persiguen los programas de la CE en esos ámbitos es el de mejorar la coordinación entre los laboratorios de los distintos países que participan en tales proyectos internacionales. Pero hemos de ser conscientes de que, además de los problemas políticos, dicha coordinación entraña dificultades técnicas no siempre fáciles de superar.

Estas tres categorías de cuestiones representan tres ejes fundamentales para la acción futura de la CE en materia de ciencia y tecnología. Pero hay más. En el cuarto programa-marco se prevén, por primera vez en la historia de la investigación comunitaria, actividades en diferentes sectores de las ciencias sociales aplicadas, a saber: métodos y políticas de enseñanza y formación, estudios sobre la marginación social y los problemas de las ciudades. En estos temas, la Comisión está presta a oír las opiniones de los mejores especialistas y recabará el auxilio de los especialistas para identificar las necesidades a satisfacer e idear las medidas más apropiadas y eficaces.

La política de la CE en el campo de la ciencia no se resolverá con decisiones, normativas, programas y gestión administrativa. La eficacia que haya podido tener hasta la fecha en el tejido de la investigación europea se debe a lo que haya podido comprometer a la comunidad científica. Para aumentar la influencia de los programas, su idoneidad y su eficacia, esa vinculación debe mantenerse, articularse y fortalecerse, donde y cada vez que resulte necesario. (*Antonio Ruberti, Vicepresidente de la Comisión de la Comunidad Europea para la Ciencia, la Investigación y el Desarrollo, Bruselas.*)

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Ardilla en vuelo



Cae la tarde, y antes que asomen los primeros brillos de la luna saca curiosa su cabecita de la oquedad del tronco la ardilla voladora. Nada se mueve en su entorno. Ningún signo amenazador. Rauda, trepa hacia las ramas. Salta de una a otra comprobando la solidez del trampolín.

La ardilla pertenece a la familia de los Esciúridos, una de las más nutridas del orden de los Roedores. Vive en cualquier bosque donde abunden piñas, hayucos, bellotas, avellanas, castañas o bayas de toda coloración. No desecha, si el hambre aprieta, las cortezas y los brotes frescos; ni desdeña la proteína animal que le ofrecen insectos, caracoles y algún pajarillo confiado.

A diferencia de la ardilla común, que salta juntando las patas, la ardilla voladora planea. Abre las extremidades, distiende un tejido membranoso, a modo de alas, y se lanza con la estabilidad del aeroplano hacia una base cercana. En este caso, el tronco de donde salió. Un metro la separa de su refugio, por lo que está frenando. Coloqué la cámara junto al nido y me ayudé de un sensor de infrarrojos. No se hubiera acercado de haber visto merodear alguien por allí.



Foto de la derecha
distancia focal: 105 mm
diafragma: F = 32
exposición: 1/22.000 de segundo
película: ISO = 100



Binarias de rayos X

En estos sistemas, densísimas estrellas se alimentan de sus compañeras, más pacíficas. Semejante canibalismo produce brillantes emisiones de rayos X y altera drásticamente la evolución de ambas estrellas

Edward P. J. van den Heuvel y Jan van Paradijs

Todas las estrellas brillan gracias a un mismo proceso fundamental: la fusión nuclear. Cuando dos o más núcleos atómicos chocan y se fusionan, liberan cantidades ingentes de energía; a modo de ejemplo, la fusión de un gramo de hidrógeno libera tanta como la combustión de 20.000 litros de gasolina. En el Sol y estrellas similares, las reacciones de fusión persisten durante miles de millones de años. Pero no son la única fuente de energía estelar; en 1971, los astrónomos identificaron un tipo extraño de emisores de rayos X: las estrellas binarias de rayos X, cuyas intensas radiaciones tenían que partir de una fuente de energía mucho más eficaz que la fusión.

Infieren los teóricos que estos objetos dobles constan de una estrella corriente y de un cuerpo estelar que ha entrado en colapso; aquélla orbita alrededor de éste, que es por lo común una estrella de neutrones. Las estrellas de neutrones son tan densas que toda su masa se halla comprimida dentro de lo que, en esencia, es un núcleo atómico de 20 kilómetros de ancho. Los componentes de estas binarias se encuentran muy próximos entre sí, y el gas fluye de la estrella normal a la de neutrones. La materia capturada forma un disco que gira velozmente y cuyo borde interior, situado justo por encima de la superficie de la estrella de neutrones, rota casi a la velocidad de la luz. La fuerza de rozamiento desarrollada en el interior del disco provoca que el gas termine por caer sobre la estrella de neutrones, en un proceso de agregación (o "acreción") duante el cual las violentas colisiones que se producen entre las partículas calientan el gas, que llega a alcanzar temperaturas de diez a cien millones de grados kelvin. A semejantes temperaturas, el gas emite torrentes de energéticos rayos X. Gramo a gramo, la agregación libera de quince a sesenta veces más energía que la fusión de hidrógeno.

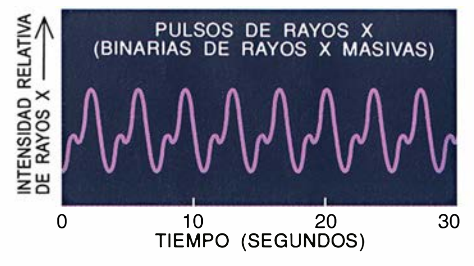
El fenómeno de acreción da cuenta de las emisiones de radiación de múltiples objetos astrofísicos, desde las estrellas jóvenes hasta los cuásares —los cuales, pese a no ser mayores que el sistema solar, brillan más que galaxias enteras gracias, casi con toda probabilidad, a la absorción de gas por un agujero negro de masa enorme—. Las binarias emisoras de rayos X sirven de modelo para desentrañar el mecanismo de agregación por su brillo y cercanía, ya que residen en el seno de nuestra propia galaxia.

El estudio de las binarias emisoras de rayos X nos deja entrever el ciclo vital de algunos de los sistemas estelares más exóticos y dinámicos. En estos dúos estelares, un miembro alimenta durante un tiempo al otro, incluso recíprocamente. Esta transferencia de materia altera la evolución de ambas estrellas; una de ellas puede llegar a pagar la factura de su glotonería con el prematuro fin de su vida en una espectacular explosión convertida en supernova. Por otro lado, las estrellas de neutrones más viejas y plácidas pueden devenir, gracias a una inyección de energía rotacional, en fuentes de radioondas de pulso rápido.

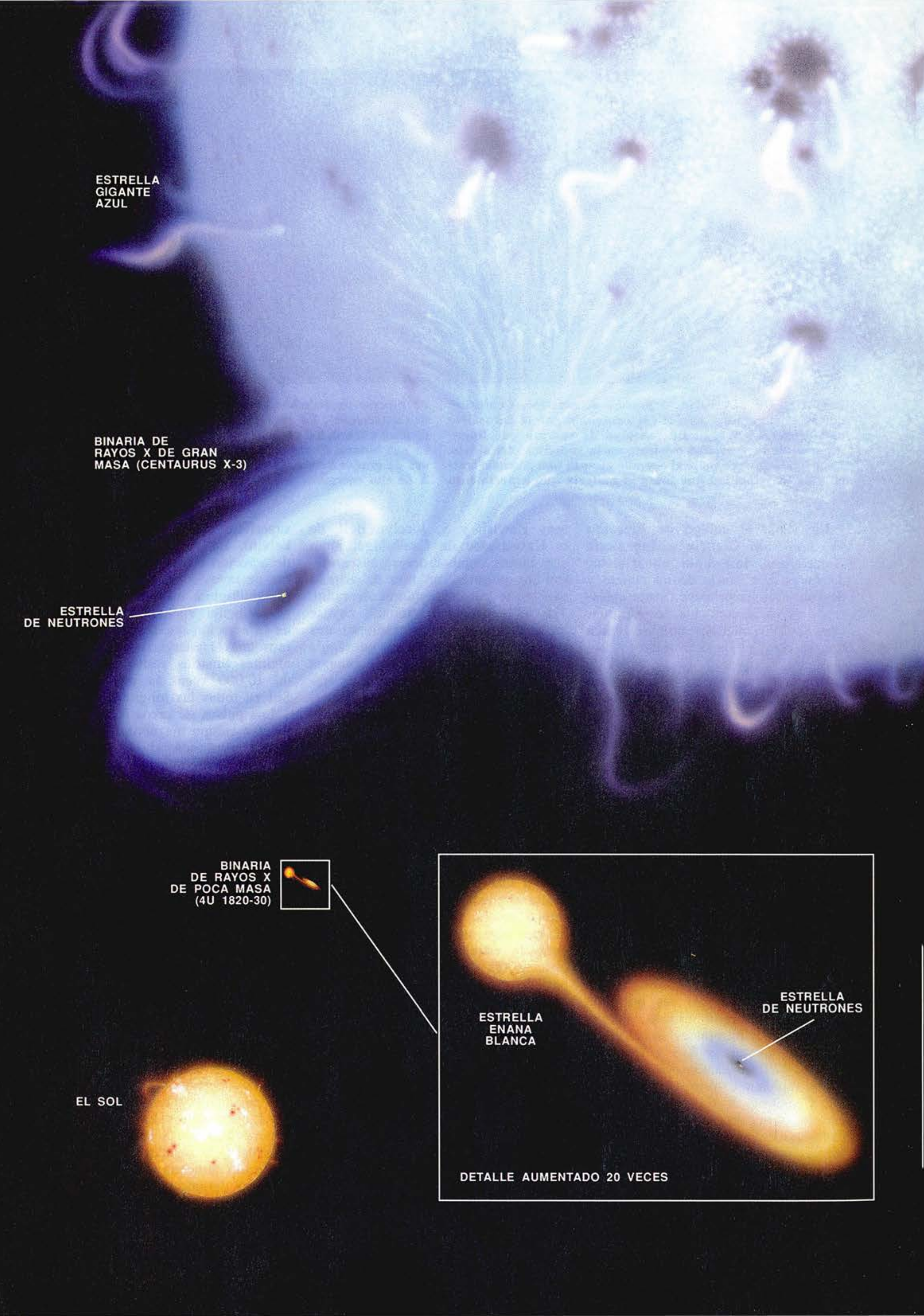
Pese a su prominencia en el cielo de rayos X, estos sistemas binarios no fueron observados hasta el amanecer de la era espacial, en los años sesenta. Los rayos X celestes son absorbidos en la alta atmósfera, lo que impide su detección en tierra. El advenimiento de la tecnología espacial abrió un nuevo campo de investigación al posibilitar que los telescopios se elevasen por encima de las capas oscurecedoras de la atmósfera terrestre.

EDWARD P. J. VAN DEN HEUVEL y JAN VAN PARADIJS vienen colaborando desde hace años en el estudio de fuentes celestes de rayos X. Van den Heuvel, doctor en ciencias matemáticas y físicas, dirige el departamento de astronomía de la Universidad de Amsterdam, donde Van Paradijs enseña desde 1988.

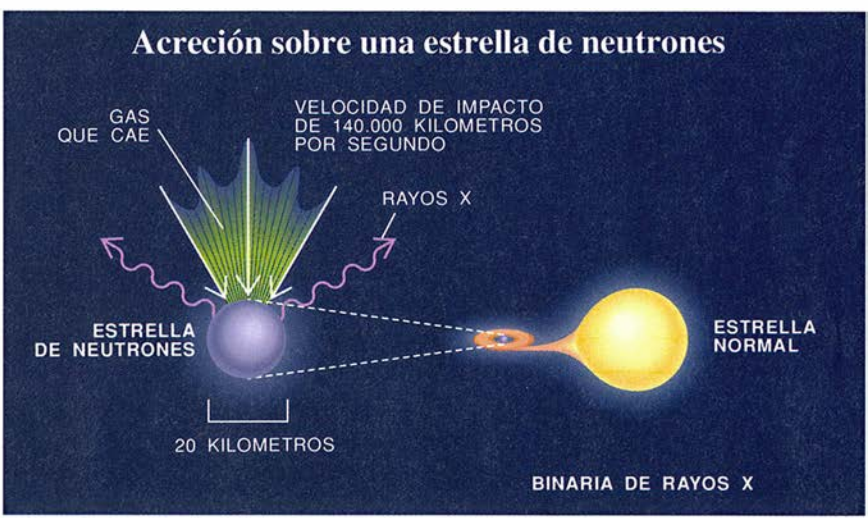
1. LAS BINARIAS DE RAYOS X abarcan dos tipos de sistemas estelares dobles muy diferentes. En ambos, una estrella de neutrones o un agujero negro se encuentra en el corazón de la fuente de rayos X. La mayoría de las binarias de rayos X, tales como Centaurus X-3, contienen una estrella azul brillante (*parte superior derecha*) cuya masa es de diez a cuarenta veces mayor que la solar. La joven estrella de neutrones emite pulsos de rayos X a medida que gira (*abajo a la izquierda*). Las binarias de poca masa normalmente contienen estrellas más viejas y parecidas al Sol. En el diminuto sistema 4U 1820-30, de poca masa (*parte inferior derecha*), ambas estrellas son objetos compactos, seguramente una estrella de neutrones y una enana blanca de menor masa, aunque mayor tamaño. Se producen ráfagas erráticas de rayos X cuando el gas se acumula en la superficie de una estrella de neutrones vieja y experimenta una detonación termonuclear (*abajo derecha*).






ESTRELLA
GIGANTE
AZUL
BINARIA DE
RAYOS X DE GRAN
MASA (CENTAURUS X-3)
ESTRELLA
DE NEUTRONES
BINARIA
DE RAYOS X
DE POCA MASA
(4U 1820-30)
ESTRELLA
ENANA
BLANCA
ESTRELLA
DE NEUTRONES
EL SOL
DETALLE AUMENTADO 20 VECES





2. CAIDA DE MATERIA, o proceso de acreción. Constituye quizás el mecanismo más eficaz concebido por la naturaleza para generar energía. La cantidad de energía que libera depende de la gravedad existente en la superficie del objeto. La materia que cae sobre el Sol sólo alcanza una pequeña fracción de la velocidad que toma la materia que experimenta un proceso de acreción sobre una estrella de neutrones muy densa (*derecha*). La energía cinética se convierte en energía térmica a través del rozamiento; el gas que cae hacia el interior en una binaria de rayos X alcanza temperaturas de 100 millones de grados kelvin, lo que desencadena la emisión de rayos X de alta energía.

En 1962, el equipo de Riccardo Giacconi, de Ciencia e Ingeniería Americanas, instalaron un detector de rayos X a bordo de un cohete y descubrieron la primera fuente celeste de rayos X conocida hasta entonces: Scorpius X-1. Su nombre indica que es el objeto más brillante de los que emiten rayos X en la constelación de Escorpio: brilla mil veces más en esas longitudes de onda que en las de la radiación visible. La naturaleza del objeto capaz de emitir así era un misterio.

En los años subsiguientes, los detectores de rayos X instalados a bordo de cohetes y sondas de gran altitud descubrieron varias docenas de "estrellas de rayos X" similares. Pero no empezó a entenderse la naturaleza de tales objetos hasta la década de los setenta, cuando la NASA lanzó el *Uhuru*, el primer satélite sensible a los rayos X, diseñado y construido por un equipo dirigido por Giacconi. Gracias a ese ingenio pudo estudiarse el cielo de rayos X durante las 24 horas del día. En sus primeros meses de funcionamiento, *Uhuru* descubrió dos intrigantes emisoras de rayos X: Centaurus X-3 y Hércules X-1. El brillo de ambas varía de una forma rápida y extremadamente regular; Centaurus X-3 lo hace una vez cada 4,84 segundos y Hércules X-1, cada 1,20. Estas fuentes resultaron ser las primeras de una gran familia de estrellas de rayos X pulsantes.

Los pulsos proporcionaron una pista crucial para determinar la naturaleza de estas fuentes. En 1967, Antony Hewish y S. Jocelyn Bell, de la Universidad de Cambridge, junto con varios colaboradores, descubrieron los púlsares, un tipo de estrella que emite pulsos regulares de radio. Tras el desconcierto inicial, cayóse en la cuenta de que los radiopúlsares son estrellas de neutrones en rápida rotación cuyos poderosos campos magnéticos generan haces de radioondas que, a modo de faros, apuntan hacia el observador terrestre una vez por giro.

Otro rasgo notable de Centaurus X-3 y de Hércules X-1 estriba en la regularidad con que experimentan eclipses, durante los cuales decae su brillo hasta una pequeña fracción del habitual. Estas ocultaciones demostraron que se trataba forzosamente de sistemas estelares binarios, lo más seguro una estrella de neutrones en órbita alrededor de una acompañante estelar mucho mayor y más tranquila, que ocasionalmente se interponía entre la estrella de neutrones y el observador. Centaurus X-3 tiene un período orbital de 2,087 días, mientras que el de Hércules X-1 es de 1,70 días.

Las piezas del rompecabezas empezaron a encajar. Los cortos períodos orbitales de las fuentes de rayos X pulsantes probaban la mutua vecindad de las dos estrellas que formaban cada sistema. Tal proximidad permite a la estrella de neutrones robarle el gas a su compañera, gas que crea el disco de acreción alrededor de la estrella de neutrones. Las partes internas del disco superan con creces las altas temperaturas de la superficie solar (unos 6000 grados kelvin). En virtud de ello, el disco de acreción brilla, sobre todo en forma de rayos X, radiación cuya energía multiplica miles de veces la de la radiación visible. El rendimiento de la acreción queda patente si sabemos que la energía en rayos X que algunas binarias emiten supera más de 10.000 veces la emitida por el Sol en todas las longitudes de onda.

Los pulsos de rayos X se deben al intenso campo magnético de la estrella de neutrones, el eje del cual se halla inclinado con respecto al eje de rotación de ésta. En las proximidades de la estrella de neutrones el campo dirige el gas que cae, eléctricamente cargado, hacia los polos de aquélla. Allí el gas choca contra la superficie y crea dos columnas de materia muy caliente (cien millones de grados kelvin) que emiten rayos X. A medida que la estrella gira, estas columnas aparecen y desaparecen de la línea de visión terrestre, lo que explica la variación del flujo visible de rayos X de la estrella. Varios investigadores propusieron de manera independiente este mecanismo para explicar algunas características de las fuentes binarias de rayos X pulsantes que sufrían eclipses. Hacia 1972 se había convertido en el modelo estándar de tales objetos.

Al cronometrar los pulsos de las binarias de rayos X se observó que no eran del todo regulares; su período de pulsación aumenta y disminuye suavemente durante un intervalo igual al período orbital, fenómeno causado por el movimiento de la fuente de rayos X

alrededor del centro de gravedad del sistema binario. Mientras la fuente avanza hacia la Tierra, cada pulso cubre una distancia más corta que el pulso anterior, y por consiguiente llega una minúscula fracción de segundo antes; cuando la fuente se aleja de la Tierra, cada pulso se retrasa ese mismo tiempo.

La amplitud de este efecto revela la velocidad a la que se desplaza la fuente a lo largo de la línea de visión desde la Tierra. Centaurus X-3 oscila hacia adelante y hacia atrás a 415 kilómetros por segundo. Esta velocidad implica que la estrella compañera tiene una masa al menos 15 veces mayor que la solar, lo cual es típico de una estrella azul brillante y de corta vida. Desde comienzos de los años setenta, se han descubierto una treintena de binarias de rayos X pulsantes. En su mayoría, las acompañantes eran estrellas azules luminosas, cuyas masas oscilaban entre 10 y 40 veces la del Sol.

Las estrellas brillantes de las binarias de rayos X muestran cambios periódicos en las frecuencias de las líneas oscuras, o líneas de absorción, de sus espectros. Estos cambios, o corrimientos Doppler, son el resultado del movimiento orbital de la estrella visible alrededor de la fuente de rayos X. La radiación de un objeto que se acerque aparecerá comprimida, o más azul; la de un objeto que retroceda, alargada, enrojecida. La magnitud del corrrimiento Doppler indica el ritmo de movimiento de la estrella. Dado que la velocidad de las fuentes de rayos X se deduce de las variaciones que sufre el período de pulsación, la ley de la gravedad de Newton servirá para obtener las masas de las estrellas de neutrones.

Caen, en su gran mayoría, entre 1,2 y 1,6 veces la masa solar. Es lo que cabía esperar teóricamente, pero se han encontrado varias binarias de rayos X no pulsantes que al parecer contienen estrellas cuya masa triplica de lejos la solar. La teoría actual sostiene que las estrellas de neutrones que superen esa masa producirán un campo gravitacional tan intenso que se contraerá sin límite, hasta formar un agujero negro, un objeto aislado del resto del universo por su propia gravedad.

A medida que se han encontrado más binarias de rayos X, se ha visto que se distribuyen en dos poblaciones distintas: binarias que contienen estrellas azules, grandes y luminosas, y binarias formadas por estrellas de menor masa y más viejas, más afines al Sol. Las binarias de rayos X que albergan estrellas azules de gran masa tienen que ser muy jóvenes. Una estrella cuya masa es quince veces mayor que la solar gasta su combustible de hidrógeno en menos de diez millones de años, en un abrir y cerrar de ojos si se compara con la edad de la Vía Láctea, cifrada en unos quince mil millones. Los sistemas estelares dobles a partir de los que evolucionaron esta clase de binarias nacieron hace tan sólo algunos millones de años, en el interior de nubes de gas interestelar. Al igual que estas nubes y otras estrellas jóvenes y calientes, las binarias de rayos X pulsantes y con mucha masa tienden a concentrarse en el plano de la Vía Láctea, pero no hacia el centro de la galaxia.

Aproximadamente la mitad de las potentes fuentes de rayos X que existen en nuestra galaxia, incluida Scorpius X-1, pertenecen a una población estelar muy diferente. Se concentran sobre todo en el bulbo lenticular del centro de la galaxia y en los cúmulos globulares, densos enjambres esféricos de estrellas. Tales regiones alojan sobre todo estrellas más viejas, cuyas edades oscilan entre los cinco mil y los quince mil millones de años.

Las binarias de rayos X de este tipo no emiten pulsos regulares, y además difieren en otros aspectos de las pulsantes y dotadas de mayor masa. Sus espectros de luz visible difieren de los que generan las estrellas normales: su luminosidad se intensifica hacia el extremo azul del espectro, y parte de su radiación emerge a longitudes de onda, o colores, concretos. Un espectro de estas características se debe a la existencia de un disco de gas, calentado por intensos rayos X procedentes de la parte interna del propio disco, que experimenta un proceso de acreción justo por encima de la superficie de la estrella de neutrones.

La emisión del disco hace que se vuelva casi indetectable la luz de la estrella compañera; ha de ser ésta, pues, bastante débil, lo que a su vez indica que su masa no puede ser mayor que la solar; por esta razón a semejantes sistemas dobles se les llama estrellas binarias de rayos X de poca masa. Las estrellas con masa solar permanecen estables durante al menos diez mil millones de años, lo que concuerda con la edad de la población estelar donde residen las binarias de este tipo.

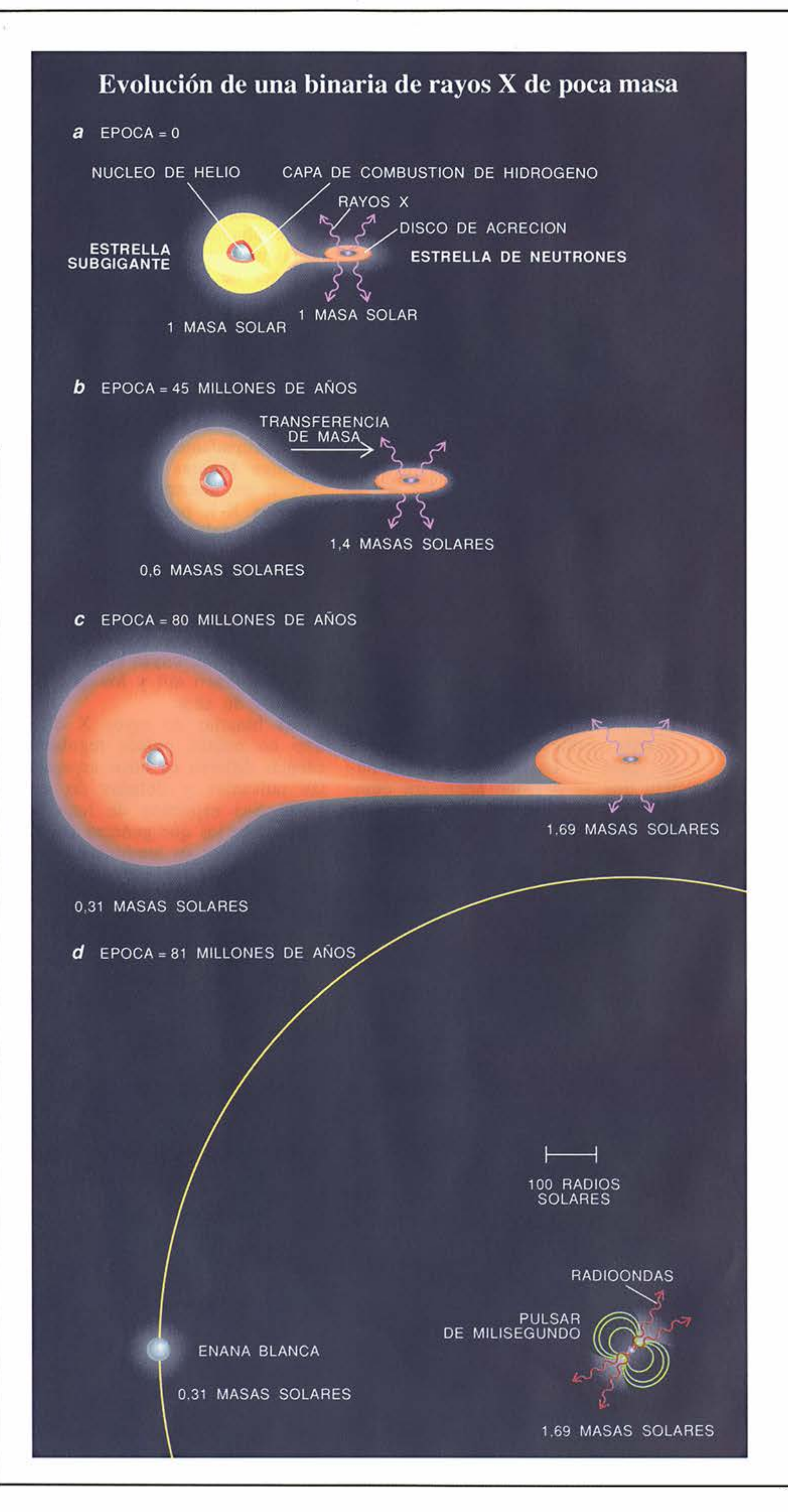
Las fuentes de rayos X de baja masa experimentan ocasionalmente fulguraciones extremas de rayos X, que han aportado abundante información sobre estos sistemas. A los pocos segundos del comienzo de una fulguración de ésas, el brillo en rayos X del objeto aumenta en un factor diez o más, alcanza un máximo que dura de unos segundos a unos minutos y decae hasta el nivel inicial en tan sólo un minuto. Esas ráfagas de rayos X se repiten irregularmente cada dos o tres horas.

Se admite que las explosiones, o ráfagas, de rayos X derivan de las reacciones de fusión nuclear desbocadas que experimenta el gas agregado sobre la superficie de una estrella de neutrones. Entre las explosiones, la nueva materia que fluye desde la estrella compañera se encarga de reponer el combustible nuclear. Esa agregación continuada provoca la emisión persistente de rayos X que se detecta entre explosiones. Pese a la naturaleza espectacular de éstas, las binarias de rayos X de masa pequeña emiten más del 90 por ciento de su energía total durante los períodos de calma, lo cual da fe de la enorme eficacia de la acreción, comparada con la fusión.

Esas ráfagas de rayos X se registran sólo en sistemas binarios de baja masa, en tanto que los pulsos de rayos X se circunscriben a los dotados de gran masa; no se conoce ningún sistema que exhiba ambos fenómenos. El factor crítico responsable de esta disparidad estriba, probablemente, en la intensidad del campo magnético de la estrella de neutrones. Las binarias de rayos X de gran masa han de contener estrellas de neutrones con potentes campos magnéticos, capaces de generar pulsos de fácil detección. Las estrellas de neutrones de las binarias de rayos X de baja masa presentan, por lo que se ve, campos mucho más débiles. Hipótesis respaldada por los modelos según los cuales un campo magnético poderoso inhibiría las inestabilidades nucleares que producen ráfagas de rayos X.

Las características dispares de las binarias de rayos X, según posean poca o mucha masa, denuncian dos orígenes y dos cursos de evolución distintos. Tras su hallazgo en 1971, los astrofísicos se percataron de que las binarias de rayos X de gran masa representaban una etapa normal en la evolución de los sistemas estelares dobles en los que la masa de los dos objetos componentes equivalía a varias masas solares. La estrella de mayor masa consume todo su combustible con rapidez y se expande hasta formar una gigante roja hinchada, cuyas capas externas se derraman sobre la estrella

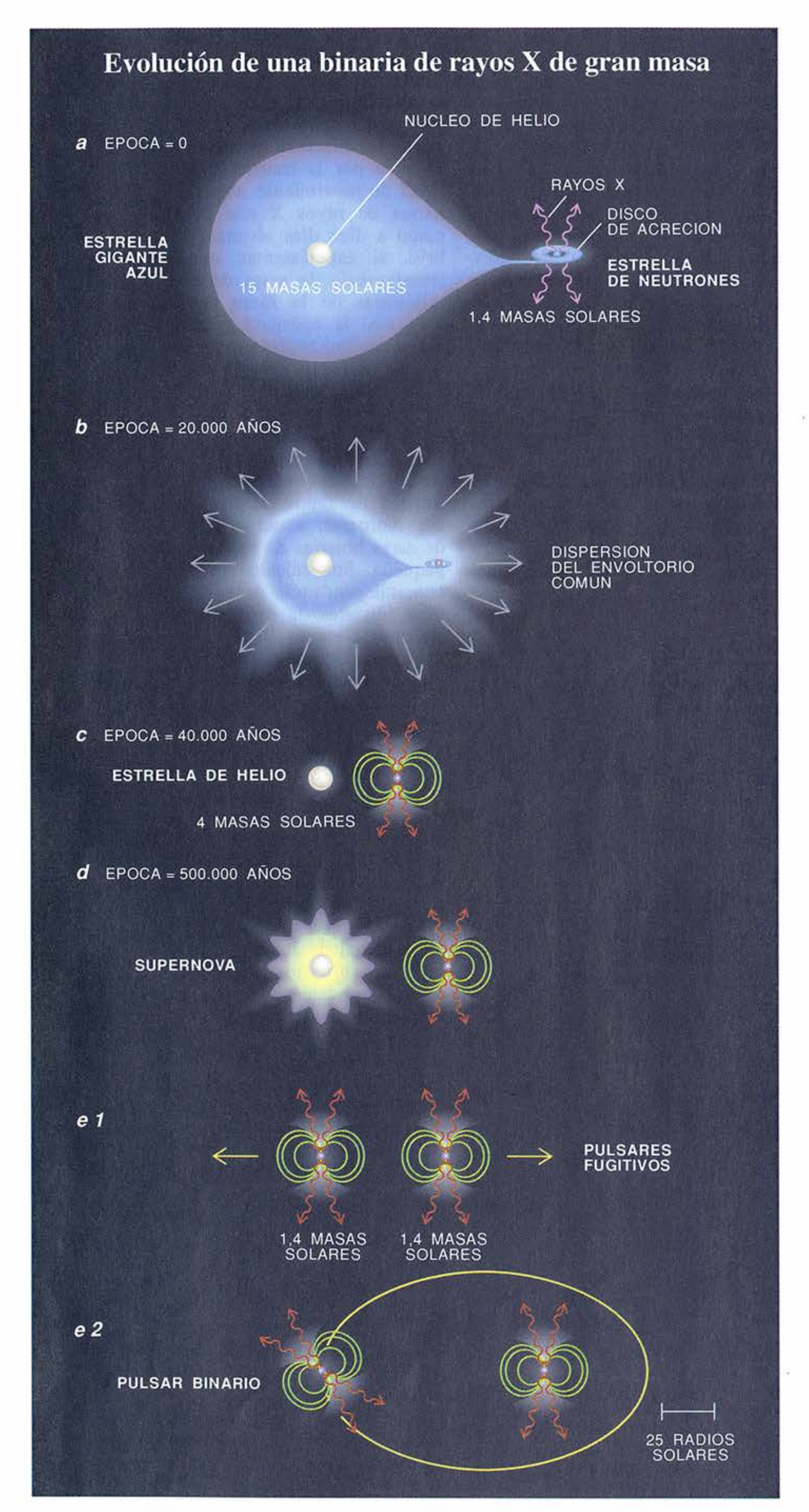
3. BINARIA DE RAYOS X dotada de poca masa. Consta, en un principio, de una estrella de neutrones que le va arrebatando materia a su compañera (*a*). La estrella de menor masa es una subgigante vieja con un núcleo de helio muy denso e inerte. La transferencia de masa ensancha la órbita de la estrella, al tiempo que la estrella de poca masa se expande poco a poco, enfriándose mientras evoluciona (*b*). La estrella de neutrones consume gradualmente toda la capa exterior de la estrella subgigante (*c*). El núcleo de helio (desnudo y ya enana blanca) permanece en órbita circular alrededor de la estrella de neutrones (*d*). La estrella de neutrones en rotación se ha convertido en un púlsar de milisegundo que emite pulsos de radioondas, pero no de rayos X. (Esta secuencia hipotética se basa en los cálculos de Paul C. Joss y Saul A. Rappaport del MIT.)



compañera, dejando al descubierto el núcleo, rico en helio, de la gigante roja. Transcurridos cientos de miles de años, la estrella de helio explotará en forma de supernova, deshaciéndose de la mayor parte de su masa externa; el núcleo remanente se contraerá ("colapsará") hasta constituirse en estrella de neutrones, que atraerá el gas de su compañera y se convertirá en una fuente de rayos X.

La formación de una binaria emisora de rayos X de poca masa requiere un conjunto de circunstancias más específico. Algunas de estas binarias pudieron haber sido en un principio parejas de estrellas de mucha masa y estrellas ligeras que giraban una en torno a la otra. La gravedad de la pequeña estrella acompañante sería insuficiente para capturar el material de la estrella primaria, de modo que su masa no aumentaría en cuantía apreciable. Cuando la primaria se autoaniquilase en forma de supernova, gran parte de la masa del sistema escaparía hacia el espacio interestelar. En la mayoría de los casos, esta merma de masa rompería el sistema binario y separaría las dos estrellas, que emprenderían caminos diferentes por el espacio; pero si, evento insólito, permanecían ligadas, su evolución posterior las llevaría a crear una binaria de rayos X de masa pequeña.

Hay un modo más plácido de que una estrella de neutrones se forme cerca de una estrella de poca masa. Si la estrella primaria tiene inicialmente menos de ocho veces la masa solar, no estallará, pero sí producirá una enana blanca, ceniza estelar mucho más densa que una estrella normal, aunque menos que una de neutrones. En la enana blanca, la gravedad de la estrella ha triturado



4. BINARIAS DE RAYOS X dotadas de gran masa. Constan en su estado inicial de una estrella azul brillante y de una de neutrones en acreción (*a*). La estrella azul se expande hasta sumergir en su capa exterior el núcleo, rico en helio, y la estrella de neutrones (*b*). El movimiento orbital de las dos estrellas en el interior de la envoltura hace que ésta se caliente y se disipe, dejando tras de sí una estrella de helio y otra de neutrones (*c*). Si la de helio tiene más de 2,5 masas solares, estalla en supernova (*d*) y forma una segunda estrella de neutrones pulsante. La explosión puede romper el sistema (*e1*); en caso contrario, quedarán dos estrellas de neutrones encerradas en una órbita muy rápida y excéntrica (*e2*). Los núcleos de helio de menor masa no estallan; acaban como enanas blancas en órbita circular alrededor de una estrella de neutrones.

los átomos constituyentes hasta convertirlos en un puré de electrones y núcleos; una enana blanca cuya masa fuese igual a la del Sol sería del tamaño de la Tierra.

A medida que la estrella de poca masa va evolucionando se expande paulatinamente. Si las dos estrellas describen órbitas muy próximas, el gas de la estrella de menor masa se agregará sobre la superficie de la enana blanca. Andando el tiempo, la masa de la enana blanca superá un valor crítico, de unas 1,4 masas solares. Entonces, la estrella enana se contraerá y formará una estrella de neutrones. Este tipo de contracción tranquila eyecta muy poco material, por lo que el sistema puede permanecer estrechamente ligado. Más tarde, las estrellas giran, se van acercando, comienza la agregación y el sistema se convierte en una binaria de rayos X de baja masa.

En estas binarias, la gravedad de la estrella de neutrones tira fuertemente de su compañera, mucho mayor pero de menor masa. La combinación de las fuerzas centrífuga y gravitatoria da lugar a una región piriforme de estabilidad, un lóbulo de Roche, que circunda la estrella de menor masa. La materia que se encuentre a extramuros del lóbulo fluirá hacia la estrella de neutrones. La transferencia de materia aumenta la distancia entre las dos estrellas siempre que la estrella que pierda materia sea la que tenga menos masa de las dos, como ocurre en el caso de las binarias de rayos X de baja masa. Cuando aumenta el tamaño de la órbita, lo hace también el lóbulo de Roche; superado por éste el tamaño de la estrella compañera, cesará el flujo de materia, y la estrella de neutrones

dejará de emitir rayos X. Ni que decir tiene que habrá algún mecanismo que siga aportando gas a la estrella de neutrones.

En uno de los tipos de binarias de rayos X de baja masa, el de los sistemas estrechamente vinculados cuyos períodos son inferiores a 10 horas, el flujo de gas se mantiene gracias a la órbita mutua de las estrellas, que se contrae de manera constante. A medida que las estrellas describen sus órbitas, van generando ondas gravitacionales que se llevan cantidad de movimiento, lo que origina un acercamiento mayor de las estrellas. Este efecto anula la tendencia de la transferencia de masa a separar a las estrellas, que se van asentando poco a poco en una órbita que se estrecha lentamente y en la que un continuo y delgado chorro de gas emigra desde la estrella acompañante hacia la estrella de neutrones. De este modo, la estrella de neutrones suma, cada año, una masa equivalente a la milésima parte de la terrestre, suficiente para dar cuenta de la luminosidad de muchas binarias de rayos X de poca masa (unos 3×10^{30} watts).

Las fuentes de rayos X más brillantes de las regiones centrales de la galaxia emiten cerca de 10 veces esa energía. Estos objetos constituyen un segundo tipo de binarias de rayos X de masa pequeña, que cuentan con períodos orbitales bastante largos, de uno a diez días. De lo pausado de estas órbitas se sigue que la separación entre las dos estrellas, así como el diámetro de la compañera normal, serán notables. Aquí el flujo de materia debe resultar del hinchamiento de la estrella acompañante, como consecuencia de los cambios físicos operados en su interior.

Tales cambios surgen en las etapas evolutivas más tardías de las estrellas parecidas al Sol. La fusión de hidrógeno, que tiene lugar en la capa que envuelve al núcleo, produce helio, el cual se va acumulando para formar un núcleo denso. A medida que la estrella envejece, la capa donde se quema el hidrógeno emigra hacia fuera, por lo que la capa exterior de la estrella se expande y enfría. Esta expansión compensa con mucho la creciente distancia entre las estrellas, causada por la transferencia de cantidad de movimiento angular. Las binarias de rayos X con períodos de cinco a diez días alcanzan el equilibrio, si experimentan una tasa de transferencia de masa de unas cinco milésimas de la masa terrestre por año, casi la cadencia necesaria para alimentar las brillantes fuentes situadas en torno al centro galáctico.

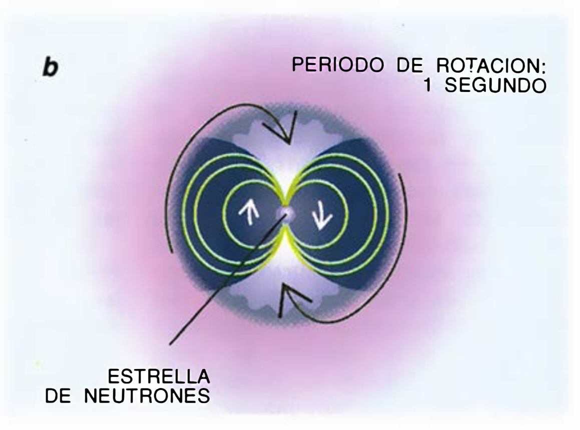
En 1982, Ronald F. Webbink, de la Universidad de Illinois, Saul A. Rappaport, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, G. J. Savonije, de la Universidad de Amsterdam, y Ronald E. Taam, de la Universidad del Noroeste, estudiaron el destino de estas binarias de rayos X de masa pequeña. Sus cálculos predicen que, con independencia de sus características iniciales, la evolución de estos sistemas siempre llega a un mismo punto final. La estrella gigante pronto pierde la totalidad de su envoltorio externo, rico en hidrógeno; su núcleo de helio desnudo queda convertido en una enana blanca que contiene entre 0,25 y 0,45 masas solares. La órbita final descrita por la estrella será casi circular a causa de la acción, durante decenas de millones de años, de un efecto de marea entre la estrella de neutrones y su acompañante de menor masa.

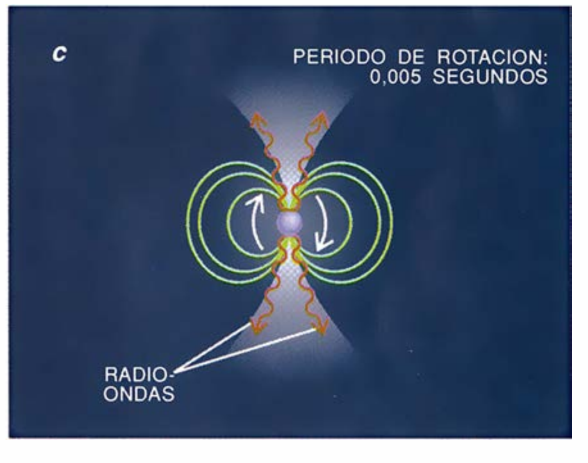
Una vez que se acaba el suministro del material de acreción, los sistemas estelares binarios dejan de emitir cantidades detectables de rayos X. Las últimas etapas evolutivas de las binarias de rayos X proporcionan, no obstante, una visión fascinante del destino de las estrellas de neutrones muy viejas. Durante esas fases tardías, su emisión más característica es de radioondas, no de rayos X.

En 1983, Valentin Boriakoff, en aquel entonces adscrito a la Universidad de Cornell, Rossolino Buccheri, del Consejo Nacional de Investigación italiano, y Franco Fauci, de la Universidad de Palermo, descubrieron el radiopúlsar binario PSR 1953+29 con el radiotelescopio de 300 metros de Arecibo, en Puerto Rico. Sus propiedades se asemejan mucho a las de las binarias de rayos X extinguidas, analizadas por Webbink y sus colegas. Las radioseñales del púlsar no mostraban los eclipses ni la absorción producida por las estrellas normales. Se concluyó que la

5. CAMPO MAGNETICO de una estrella de neutrones joven; impide que el gas que cae hacia la estrella arribe a la superficie, salvo en los dos polos magnéticos. Dos columnas de gas muy caliente con emisión de rayos X, de un kilómetro de ancho cada una, reciben el gas en los polos de la estrella de neutrones. El eje de rotación de la estrella está inclinado con respecto a su eje magnético, de modo que el observador percibe pulsos de rayos X regulares a medida que los polos magnéticos, al girar, aparecen y desaparecen de la línea de visión del observador.

6. ROTACION DE UNA ESTRELLA de neutrones en una binaria de rayos X, un proceso condicionado por la acreción. El campo magnético de la estrella de neutrones define el borde interior del disco que la circunda, hecho del gas que cae hacia ella. En la estrella joven el campo es fuerte, por lo que el borde interior del disco está distante y se mueve lentamente (*a*). A medida que se debilita el campo magnético, el borde interior del disco de acreción se desplaza hacia el interior (*b*). La estrella va agregando deprisa materia en movimiento, lo que provoca que gire a mayor velocidad. Para cuando cese la acreción, la estrella de neutrones podría estar dando cientos de rotaciones por segundo (*c*).





compañera del púlsar sería a su vez un objeto compacto y que, debido a su poca masa, tenía que tratarse de una enana blanca.

Uno de los rasgos más sorprendentes de PSR 1953+29 es su período de pulsación en radio, muy rápido, de 6,1 milisegundos, o 160 rotaciones por segundo. Un año antes, el grupo de Donald C. Baker, de la Universidad de California en Berkeley, había encontrado otro, PSR 1937+21, con un período de sólo 1,6 milisegundos. Hoy se les considera prototipos de una clase de estrellas de neutrones de rotación rápida, los púlsares de milisegundo.

La historia de las binarias de rayos X que los astrofísicos han inferido pone en claro la razón de tamaña rotación celerísima de estos púlsares. En las binarias de rayos X de baja masa (y también en muchas binarias de rayos X de gran masa), el movimiento orbital impide que la materia caiga directamente sobre la estrella de neutrones; describe, por contra, una órbita alrededor de la estrella, formando un disco de acreción. Parte de la materia del borde interior del disco cae sobre la estrella de neutrones, con lo que, durante las etapas finales de la agregación, se acelera mucho la rotación de la estrella.

Las compañeras de casi todos los púlsares binarios que emiten en radio han evolucionado hasta convertirse en enanas blancas o estrellas de neutrones. En alguna etapa, las compañeras fueron gigantes que desbordaron sus lóbulos de Roche y descargaron parte de su materia sobre las estrellas de neutrones, incrementando el ritmo de rotación de éstas. En ese período las estrellas dobles serían percibidas como binarias de rayos X; una vez la estrella compañera pierde sus capas externas y cesa el proceso de acreción, queda al descubierto un púlsar de milisegundo.

La potencia de la radioemisión de un púlsar varía en proporción a la cuarta potencia del ritmo de rotación. Las estrellas de neutrones de milisegundo pueden ser detectadas sólo porque su velocidad de rotación aumentó, gracias sus compañeras, durante la fase de binaria emisora de rayos X. Los radiopúlsares que han adquirido así su rotación rápida se denominan púlsares reciclados, término sugerido por V. Radhakrishnan, del Instituto de Investigación Raman en Bangalore.

A partir de 1987, varios observadores —particularmente los grupos dirigidos por Andrew G. Lyne, de la Universidad de Manchester, Shrinivas R. Kulkarni, del Instituto de Tecnología de California, y Alexander Wolszczan, del Observatorio de Arecibo— encontraron en los cúmulos globulares un coto privilegiado para la caza de púlsares binarios y de milisegundo. El estudio de los cúmulos globulares ya ha conducido a la detección de 32 radiopúlsares, un 70 por ciento de los cuales rotan en menos de 10 milisegundos, lo que refleja que son reciclados. Esta munificencia celeste es consecuencia de la naturaleza extremadamente densa de los cúmulos globulares. En sus regiones centrales, estos cúmulos pueden contener más de 10.000 estrellas por año luz cúbico, un millón de veces la densidad de estrellas que puebla la esquina que ocupa el Sol en la galaxia. Ante tal concurrencia, las estrellas de neutrones tienen muchas posibilidades de cruzarse con una compañera estelar y capturarla. Los cúmulos globulares albergan de 200 a 1000 veces el número de binarias de rayos X por cada millón de estrellas para la galaxia en su conjunto.

Además de los púlsares binarios mencionados, se ha identificado una variante de estos objetos más inusual, con características muy diferentes. A menudo sus órbitas son sumamente excéntricas, y sus compañeras contienen de 0,8 a 1,4 veces la masa solar. Lo más seguro es que estos objetos surgiesen a partir de binarias de rayos X de masa grande. Veamos cómo.

En binarias de rayos X dotadas de masa abundante, la acreción insta el giro de las dos estrellas hasta situarse cada vez más próximas la una a la otra (al contrario de lo que sucede con las binarias de rayos X de

poca masa). Este proceso, junto con el hinchamiento de la estrella compañera a medida que evoluciona, hace que la acompañante desborde completamente su lóbulo de Roche, englobando en el proceso a la estrella de neutrones. La resistencia por rozamiento provoca que la estrella de neutrones vaya, en su rotación en espiral, hacia su compañera. Llega un momento en que el rozamiento genera tanto calor que arranca la capa de hidrógeno gaseoso de ésta, y lo que queda al final es una estrella de neutrones en apretada órbita alrededor del núcleo desnudo de su compañera, hecho de helio y elementos pesados.

Si este núcleo tiene masa suficiente, terminará, convertido en supernova, por estallar, y se producirá una segunda estrella de neutrones. La fuerza de la explosión y la precipitada pérdida de masa hará que la órbita de la estrella se torne muy elíptica; en muchos casos la estrella se liberará completamente y se convertirá en un púlsar fugitivo. Si la órbita sobrevive, las estrellas de neutrones seguirán su curso excéntrico para siempre; con el paso del tiempo sus órbitas se irán estrechando debido a la emisión de ondas gravitatorias. Uno de los púlsares binarios estudiados con mayor detenimiento, PSR 1913+16, consta de dos estrellas de neutrones que recorren una órbita elíptica una vez cada 7 horas y 45 minutos. Las propiedades extremas de este sistema hacen de él un sensible campo de prueba de varios aspectos de la teoría de la relatividad de Einstein, como demostró Joseph Taylor, de la Universidad de Princeton —trabajo por el que ha recibido en 1993 el premio Nobel de física, compartido con Russell A. Hulse—.

Estudios recientes sobre los púlsares binarios han desterrado una idea muy arraigada sobre la transformación de las estrellas de neutrones con el tiempo. Basándose en el análisis estadístico de los púlsares, solía aceptarse que el campo magnético de una estrella de neutrones se debilitaba si faltaba ayuda externa, hasta desaparecer en poco tiempo. La verdad es otra: la existencia de púlsares reciclados demuestra que persiste algo de campo magnético, incluso en sistemas viejísimos. Es más, las estrellas acompañantes en los púlsares binarios ofrecen un modo de determinar la edad de esas ancianas.

Según se ha podido observar, tres de los púlsares de milisegundo tienen por compañeras a enanas blancas, que sirven como cronómetros naturales. Las enanas blancas irradian sin cesar el calor que les queda de sus días de núcleo de gigante roja. El tiempo las va enfriando y enrojeciendo progresivamente; el color delata, pues, su edad.

En 1986 Kulkarni midió el color de la enana blanca compañera de PSR 0655+64 y concluyó que debía de tener al menos 500 millones de años. Mediante un razonamiento similar, los grupos encabezados por R. Bell, en el Observatorio Anglo-australiano, John Danziger, en el Observatorio Europeo del Sur, y Charles Bailyn, de la Universidad de Yale, determinaron que la enana blanca del sistema binario del púlsar PSR J0437–4715 tiene alrededor de dos mil millones de años. Los púlsares de estos sistemas deben de ser bastante más viejos, ya que se formaron mucho antes de que sus compañeras hubieran evolucionado hacia su etapa de enana blanca, y sin embargo retienen campos magnéticos sustanciales. Si no, no podría detectárselos.

Un trabajo reciente, a cargo de Frank Verbunt, Ralph A. M. J. Wijers y Hugo Burm, del Centro de Astrofísica de Altas Energías de los Países Bajos, añade pruebas de la persistencia de los campos magnéticos de las estrellas de neutrones. Estudiaron tres binarias de rayos X de poca masa, bastante anómalas, que son también púlsares de rayos X; cada una contiene una estrella de neutrones altamente magnetizada. Se origine como se origine, una estrella de neutrones siempre pierde al menos varias décimas de masa solar en forma de neutrinos. Por esa causa el sistema binario aumenta de tamaño y se interrumpe el flujo de gas. No podrá haber agregación hasta que el sistema binario se contraiga a causa de la emisión de radiación gravitacional o la estrella compañera empiece a convertirse en una gigante.

Ambos mecanismos tardan un tiempo considerable en hacer efecto. Este dato permitió a Verbunt y su equipo ponerles cotas inferiores a las edades de las estrellas de neutrones con agregación en los púlsares de binarias de rayos X de masa pequeña. En el caso de Hércules X-1, hallaron que la intensamente magnetizada estrella de neutrones tiene al menos 500 millones de años. Está claro que los campos magnéticos de las estrellas de neutrones no decaen de forma espontánea, al menos no en estas escalas de tiempo.

Y sin embargo los campos magnéticos de casi todos los radiopúlsares binarios son entre 100 y 10.000 veces más débiles que los campos de los radiopúlsares jóvenes y normales, descienda el púlsar binario de una binaria emisora de rayos X de mucha o de poca masa. La debilidad de esos campos parece que se debe a algún factor común a todos los púlsares binarios. El más evidente es el fenómeno de la acreción. En 1986, Taam y uno de nosotros (van den Heuvel) propusimos, con el respaldo de datos de observación, un vínculo entre acreción y debilitamiento del campo. Se han publicado varios modelos para explicar la naturaleza de esa relación.

Según una hipótesis, las capas agregadas recientemente sobre la superficie de una estrella de neutrones forman una zona conductora de electricidad que sólo deja salir al exterior una pequeña fracción del campo magnético de la estrella. Para Ganesan Shrinivasan y D. Bhattacharya, del Instituto de Investigación Raman, y A. G. Muslimor y A. I. Tsygan, del Intituto Politécnico Ioffee de San Petersburgo, la disipación del campo magnético de una estrella de neutrones se debe a la rotación decreciente de ésta, deceleración que ocurre antes y durante las primeras etapas de la acreción. Una vez que el campo magnético se ha debilitado por debajo de un umbral crítico, la acción de la acreción invierte la tendencia a que disminuya la velocidad de rotación, pero esta inyección de energía rotacional no logra restaurar por completo la fuerza original del campo magnético.

En cualquier caso, todo indica que los radiopúlsares de milisegundo mantendrán sus campos y seguirán latiendo en el futuro durante miles y miles de millones de años. En cuanto superan su refulgente etapa de emisión de rayos X, pocas cosas hay en el cosmos más inmutables que ellos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE X-RAY UNIVERSE. Dirigido por Wallace Tucker y Riccardo Giacconi. Harvard University Press, 1985.

A NEW CLASS OF PULSARS. Donald C. Backer y Shrinivas R. Kulkarni en *Physics Today*, vol. 43, n.º 3, páginas 26-35; marzo de 1990.

PULSARS TODAY. Francis Graham Smith en *Sky and Telescope*, vol. 80, n.º 3, páginas 240-244; septiembre de 1990.

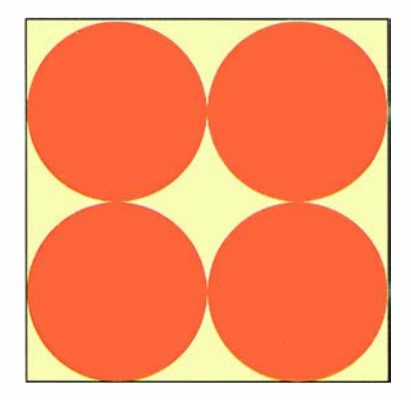
X-RAY BINARIES AND RECYCLED PULSARS. Dirigido por E. P. J. van den Heuvel y S. A. Rappaport. Kluwer Academic Publishers, 1992.

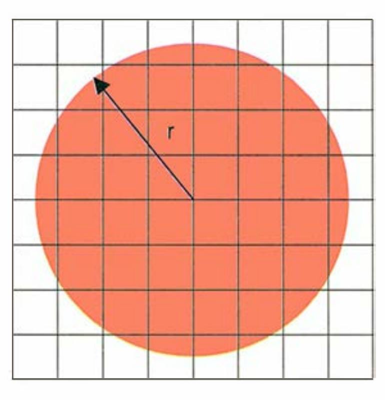
Colocaciones de círculos

El estudio de las yuxtaposiciones de círculos subyace a cuestiones interesantes de la geometría. Sus soluciones hallan aplicación en electricidad, aerodinámica y química

Marcel Berger

¿Cuál será la forma óptima de adosar círculos para cubrir lo mejor posible una superficie determinada? El problema general es notable por su dificultad, no obstante la sencillez y brevedad de su formulación. Un problema similar, el apilamiento de esferas en el espacio, sigue pendiente de solución. En compensación, sabemos hoy situar de la forma más homogénea posible un gran número de casquetes esféricos sobre una esfera, y por yuxtaposición de círculos se calcula, por ejemplo, el flujo aerodinámico en torno al ala de un avión.





1. LOS CIRCULOS de igual radio recubren un plano infinito con máxima densidad cuando ocupan los nodos de un retículo hexagonal regular. En cambio, en un cuadrado de lado igual a cuatro veces el radio de los círculos, la colocación más densa es la disposición cuadrada. Para demostrar que la densidad puede ser definida como la razón de la suma de las áreas de todos los círculos al área de la superficie que los alberga, se demuestra que tal razón no depende de los recipientes más y más grandes utilizados para recubrir el plano, ya sean cuadrados o círculos, pongamos por caso. En las superficies cuadradas, por ejemplo, la definición es válida sea cual fuere la orientación de los lados de los cuadrados; cuando son círculos el centro puede ser ubicado donde se quiera. Para cada recipiente circular, la densidad indicada está correctamente definida, pues el número de puntos de coordenadas enteras contenidos en el círculo de radio r es casi πr^2 (*abajo, a la derecha*). En efecto; el área del disco de radio r es πr^2 y cada punto de coordenadas enteras tiene asociado un cuadradito de lado 1, cuya área es igual a 1. La magnitud de los errores es del orden de la longitud de la circunferencia de radio r, o sea, $2\pi r$, que es despreciable frente a πr^2 cuando r se hace muy grande.

El problema básico, el más sencillo, es el de la colocación de círculos del mismo radio (que tomaremos igual a 1) sobre un dominio del plano de manera que el área descubierta de la región plana de que se trate sea lo menor posible.

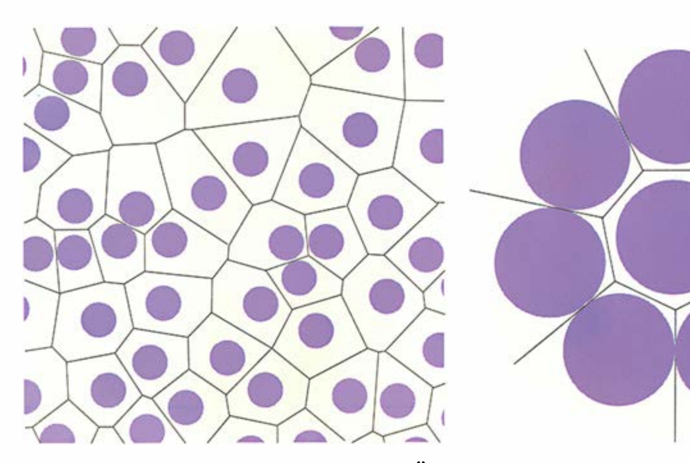
En el caso de un dominio plano infinito, la disposición óptima consiste en situar los centros de los círculos en los nodos de una red hexagonal regular de paso igual al diámetro de los círculos. ¿Cómo demostrar este resultado? Señalemos que, si la región del plano que ha de recibir los círculos se reduce a un cuadrado de lado igual a 4, la cobertura óptima no corresponde a la malla hexagonal mencionada, sino a la mostrada en la figura 1, abajo a la izquierda.

La dificultad del problema reside en que la disposición óptima correspondiente a un dominio finito no posee las mismas características que la óptima para un dominio infinito. En los cuadrados de lado muy grande, la disposición que proporciona densidad máxima es la hexagonal regular. El concepto de densidad de una colocación en un dominio plano finito bordea la obviedad: consiste en dividir la suma de las áreas de todos los círculos colocados entre el área total de la región plana recipiente; si tal región es infinita, se busca el límite del cociente anterior cuando los dominios recipientes se hacen más y más grandes, tendiendo a infinito.

La demostración de que la disposición hexagonal regular determina la densidad máxima en un dominio infinito fue presentada en 1892, en un congreso de matemáticos escandinavos. Dicho trabajo, debido a Axel Thue, carecía de rigor; fue Lazlo Fejes Toth

MARCEL BERGER, del Centro Nacional de Investigaciones Científicas, es director, en comisión de servicios, del Instituto de Altos Estudios de Bures-sur-Yvette.

quien proporcionó la primera demostración correcta, en 1940. Fejes Toth asociaba a cada colocación de círculos su descomposición de Voronoï, en la que a cada círculo se le asocia el dominio formado por los puntos que distan menos de su centro que de los centros de los demás. La disposición hexagonal regular es óptima porque ningún disco puede recubrir mayor área del dominio de Voronoï que la conseguida al situar los discos en la disposición hexagonal regular. En efecto, cuando un círculo sólo está rodeado por sus círculos, éstos no son tangentes sino en el caso de que la disposición sea la hexagonal regular; en cualquier otra disposición, los dominios de Voronoï se hallan peor recubiertos. Y cuando un círculo está rodeado por siete o más círculos, el espacio que dejan sin recubrir es todavía mayor.



2. DESCOMPOSICION DE VORONOÏ asociada a una colocación de círculos. Definimos, para cada círculo, la región constituida por los puntos que distan menos de su centro que del centro de algún otro círculo. La determinación práctica de la descomposición así asociada a un conjunto de puntos del plano se conoce por "problema de las estafetas". Estos dominios de Voronoï se definen asimismo en el espacio. Los dominios de Voronoï se utilizan en el plano para demostrar que la colocación hexagonal regular es la más densa; la fracción que cada círculo recubre en su región de Voronoï es máxima en esa disposición. Cuando un círculo está rodeado por otros siete, el Voronoï del central posee una superficie superior a la que corresponde a una colocación hexagonal regular.

No sólo existen círculos (y discos) en el plano; es posible generalizar su definición a otras superficies, por ejemplo, una esfera. En ésta, un círculo es el conjunto de sus puntos situados a una distancia dada (el radio, r) de un punto centro; esta distancia ha de medirse sobre la superficie esférica, como la mediría un hilo tenso sobre esta. De aquí resulta que, en una esfera de radio 1, el radio de una circunferencia sólo puede tomar valores menores que π (*véase la figura 3*). En el caso del valor π el círculo queda reducido a un punto: el antípoda del centro. El equivalente del disco plano es, en la esfera, un casquete esférico.

¿Cómo ubicar sobre la esfera círculos de radios todos iguales a r? El problema parece más sencillo que la colocación de círculos en el plano, por ser finito el número de los que podemos situar. Nuestro objetivo, sin embargo, es ligeramente diferente, pues buscamos no tanto la disposición óptima de los círculos cuanto su número máximo en función del radio r. Un problema equivalente reza como sigue: fijado el número de círculos, hallar el radio máximo que permite situarlos sin que se traslapen. Se trata, pues, de situar los centros de los círculos lo mejor posible, pues cuando el radio de los círculos es máximo, sus centros se encuentran dos a dos lo más alejados posible. Este problema, muy difícil, fue propuesto por M. Tammes, quien publicó en 1930 un artículo sobre la repartición de los poros en la superficie de los granos de polen.

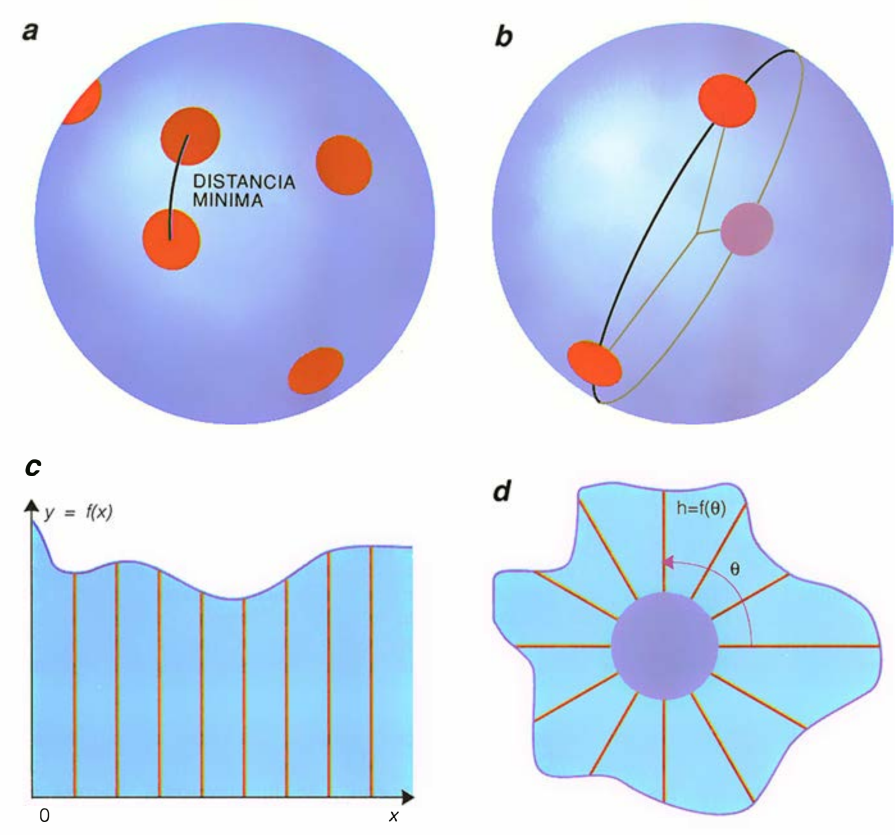
El problema de Tammes se presenta en química, especialmente en moléculas como los fullerenos, donde los átomos de carbono forman hojitas que se cierran sobre sí mismas. ¿De qué forma se disponen los átomos de carbono, y por qué lo hacen así? Cierto que los átomos se atraen; pero su aproximación se ve limitada por el volumen que ocupan, por lo que acaban distribuyéndose en una configuración "óptima". El problema aparece igualmente en física del estado sólido, y en toda disciplina donde deban disponerse puntos sobre una esfera (emisora y antenas sobre la Tierra, por ejemplo). Y se plantea, asimismo, a la hora de proyectar reactores nucleares y pelotas de golf, como veremos.

El matemático se tropieza con el problema de Tammes al querer determinar un valor aproximado del valor medio de una función definida sobre una esfera. Aunque el caso clásico es el de las funciones reales de una variable real, o sea, funciones que asocian a un número real x un valor real y igual a $f(x)$, no hay dificultad en asociar un número real h a todo punto de una esfera (el número h podría representar, por ejemplo, la altura en la que la temperatura de la atmósfera terrestre es igual a 0 ºC.)

Para calcular el valor medio de h se utiliza el mismo método que para calcular el valor medio de una función de una variable real, a saber: se divide la suma de valores que la función toma en N puntos entre el número N de tales puntos. ¿Y cómo elegir de manera óptima tales puntos en la esfera? La precisión del cálculo depende del número N, pero en el caso de que N sea suficientemente grande, ¿cómo habrá de ser la distribución de puntos para conseguir, en el caso general, una buena aproximación del valor medio de la función (o "integral" de la función)? Vamos a considerar tres casos: que el número de puntos sea pequeño (problema de Tammes); que el número de puntos sea de algunos centenares (problema de las bolas de golf); y que el número de puntos sea muy grande (¡o infinito!).

¿Por qué resulta difícil disponer regularmente sobre la esfera unos cuantos puntos? La repartición de un número cualquiera N de puntos en un círculo es evidente: deben ser situados en los extremos de radios vectores que formen ángulos de $360/N$. La dificultad se presenta cuando el espacio de base tiene dos dimensiones (y se encuentra, por lo tanto, en el seno de un espacio de tres dimensiones por lo menos), pues mientras en el plano podemos construir polígonos regulares de cualquier número de lados, en el espacio únicamente existen cinco poliedros regulares convexos, a saber, los de 4, 6, 8, 12 o 20 vértices, lo cual nos hace presentir el origen de la dificultad. Además, como veremos para los valores 8 y 20, el cubo y el dodecaedro no determinan configuraciones idóneas.

Conocemos también poliedros semirregulares (el balón de fútbol) cuyas caras son polígonos regulares y cuyos vértices poseen todos la misma configuración, pero el número de tales figuras es tan sólo trece. El problema de Tammes sigue pendiente de solución, a pesar de haber sido estudiado por buen número de matemáticos. Resulta fácil demostrar que



3. EL PROBLEMA DE TAMMES, estudiado desde hace más de medio siglo, consiste en la determinación de *N* puntos sobre una esfera de modo que la mínima distancia entre pares de puntos sea máxima (*a*). Para dos puntos, la solución consiste en situarlos en los antípodas. Dado que tres puntos definen un plano, que corta a la esfera en un círculo, la solución del problema consiste en situar los tres puntos en un triángulo equilátero inscrito en un círculo máximo (*b*). Puede demostrarse que existen distribuciones óptimas para todo número de puntos, *N*. El problema de la repartición uniforme de puntos sobre la esfera se presenta al buscar aproximaciones del valor medio de una función definida sobre una esfera. Para hallar el valor medio de una función definida sobre un intervalo de números reales se divide la suma de los valores que toma la función en N puntos equidistantes por *N* (*c*). Para una función definida sobre un círculo el método es análogo (*d*), pero en el caso de una esfera tal procedimiento no es admisible, si no se "divide bien" la superficie de la esfera.

posee siempre una solución teórica cualquiera que sea el valor de *N*. Los primeros resultados notables fueron los publicados hacia 1950 en tres artículos por Bartel Van der Waerden, K. Schütte y Walter Habicht. Entre los tres hallaron el valor máximo de la distancia mínima entre pares de puntos correspondientes a los casos 5, 6, 7 y 8 puntos, así como la posición explícita de los puntos correspondientes. En el caso de 9 puntos encontraron el valor máximo del radio, pero no la distribución de los centros. Por último, determinaron, para cada entero *N*, una cota superior para la distancia mínima entre pares de centros.

Volvamos a ocuparnos de valores bajos de *N*. Dos puntos se reparten la esfera de forma óptima cuando son antípodas; se encuentran entonces a máxima distancia uno de otro. Tres puntos deben hallarse dispuestos sobre un ecuador, en triángulo equilátero. Cuatro puntos han de estar ubicados en los vértices de un tetraedro regular. Dejo a cargo del lector la demostración de optimalidad de tales disposiciones, aunque podemos observar que las soluciones corresponden a configuraciones de máxima simetría, como sugiere la intuición.

Pasemos a seis puntos: la intuición sigue siendo guía certera, pues la única configuración óptima es la del octaedro regular. Resulta natural suponer que cinco puntos pueden quedar más alejados que seis: dado que hemos eliminado uno de los vértices del octaedro, disponemos de más sitio para dar acomodo a los cinco restantes, alejándolos un poco más unos de otros. Sin embargo, la intuición incurre aquí en error, pues al desplazar los cinco puntos se obtienen muchas otras configuraciones en las que la distancia óptima es igual a la que se tiene para seis puntos, pero no inferior.

Cuando *N* es igual a 7, la configuración no es elegante, cosa poco sorprendente, pues no existen poliedros regulares de siete vértices. Para ocho puntos tiende uno a pensar que la mejor repartición es el cubo. Pero ¿no existirá una repartición mejor? Así es, en efecto. Al hacer girar una de las caras se mantienen constantes las distancias entre los vértices en cada una de dos caras (la que hemos movido y la opuesta), pero aumentamos todas las demás. De aquí la idea de hacer girar la cara superior al tiempo que la inclinamos un poco hacia abajo y subimos paralelamente la cara inferior (*véase la figura 4*). Al proceder así aumentamos simultáneamente las distancias entre puntos de las dos caras horizontales.

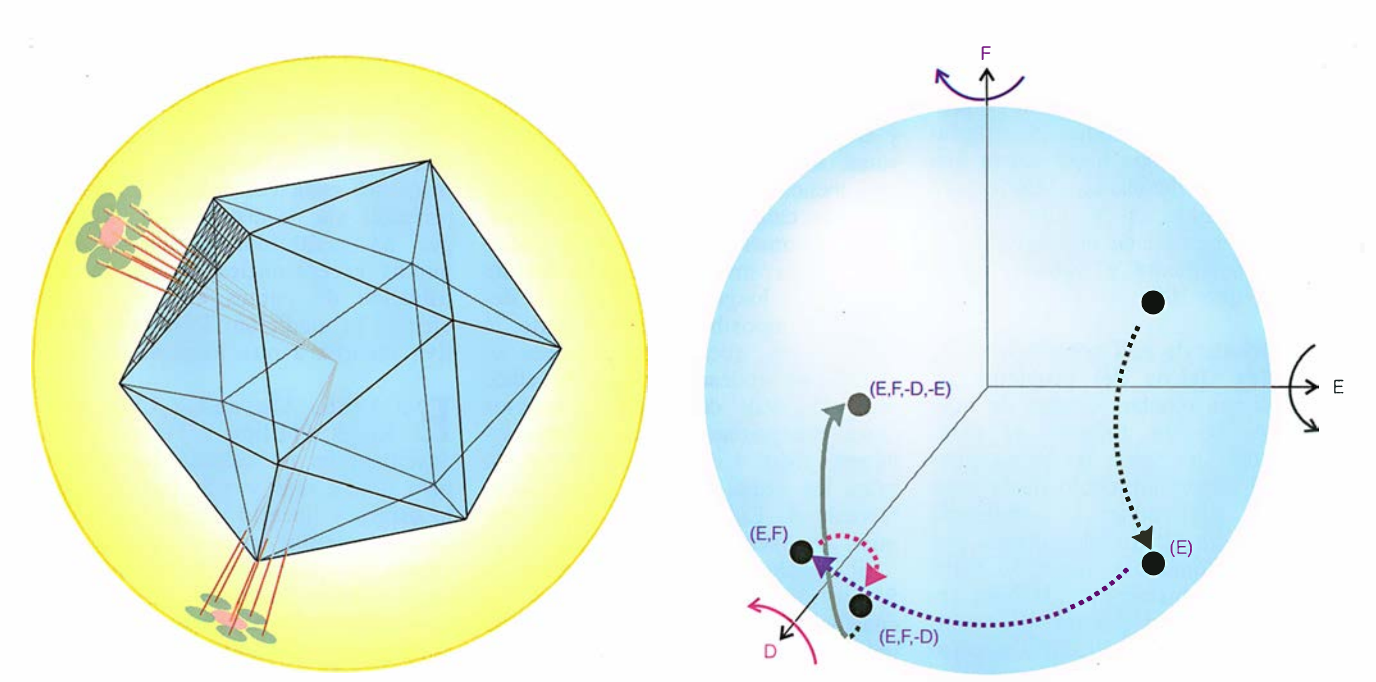
K. Schütte, Walter Habitch y B. Van der Waerden demostraron que, en el caso de ocho puntos, la configuración óptima se obtiene por este método y constituye un antiprisma cuadrado (es decir, dos cuadrados iguales y con el mismo eje, uno de los cuales está girado 45° respecto al otro) y tal que los lados obtenidos al unir los vértices de los cuadrados opuestos sean iguales al lado de cada cuadrado. Tal figura posee menos simetrías que el cubo.

La intuición, que nos inclina hacia la simetría, no es pues de una fiabilidad absoluta; las soluciones del problema de Tammes para los valores 4, 6, 8, 12 y 20 no son siempre poliedros regulares. Lo son, sí, para 4, 6 y 12, pero no lo son ni para 8 ni para 20.

Que yo sepa, los únicos casos en los que hoy conocemos el valor máximo de la distancia mínima entre pares de puntos de una distribución corresponden a los casos 1, 2, ..., 12 y 24. Para $N = 12$, la solución es un icosaedro regular (solución única); el fenómeno observado en el paso de 5 a 6 vértices se repite ahora para 11 vértices: no podemos conseguir mejores resultados que con 12 puntos. Cuando $N = 20$, se obtienen resultados bastante mejores que con un dodecaedro regular (distancia angular máxima de 47° 26′, frente a los 41° 49′ para el dodecaedro) aplicando la transformación que hace pasar del cubo al antiprisma cuadrado.

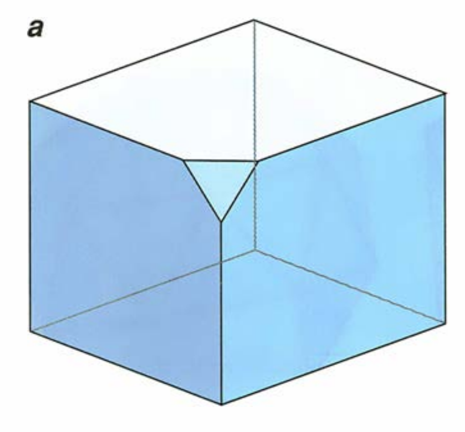
Sabemos, en fin, que los poliedros semirregulares, como el balón de fútbol (la configuración del fullereno C_{60}) no son en general óptimos, salvo para *N* igual a 24, pues R. Robinson demostró en 1961 que el valor óptimo para *N* igual a 24 es 43° 41′ y corresponde al poliedro semirregular denominado cubo chato (o truncado), objeto trigonométrico sorprendente, pues con el dodecaedro

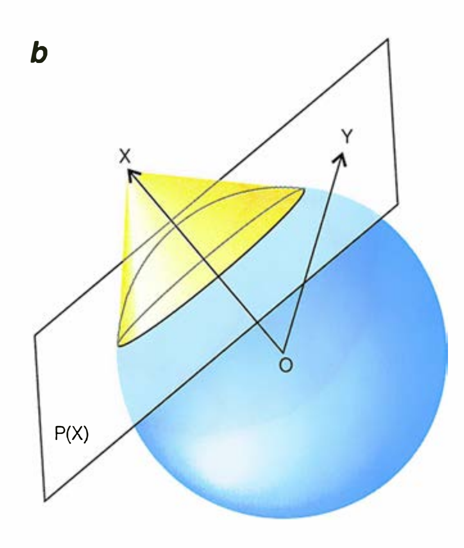
4. **LA SOLUCION del problema de Tammes para $N = 8$ se obtiene deformando un cubo (*a*) inscrito en la esfera; se gira una de las caras (*la superior, en la figura*), agrandándola, y lo mismo con la cara opuesta. Se obtiene el antiprisma cuadrado (*b*). Se indican asimismo las soluciones correspondientes a $N = 12$ (*c*), 11 (*d*), 24 (*cubo truncado, e*) y 60 (*f*); en el caso $N = 60$, la configuración en balón de fútbol, que es la de la molécula del fullereno C_{60}, con 60 átomos de carbono, no es la óptima.**



5. **UNA BOLA DE GOLF contiene al menos 12 huecos que sólo tienen cinco vecinos, en el caso de que todos los huecos sean del mismo radio. La casa *Slazenger* sitúa estos 12 huecos de orden 5 en los vértices de un icosaedro y proyecta sobre la superficie de la bola redes hexagonales de huecos que ocuparían las caras del icosaedro definido por tales vértices.**

6. **LA DISPOSICION OPTIMA para situar un número infinito de puntos sobre la esfera, maximizando la distancia mínima entre pares de puntos, consiste en aplicar sucesivamente a un punto elegido al azar tres giros de ángulo 126º 52′ en torno a tres ejes perpendiculares dos a dos. En la figura se indica, junto a cada punto, la secuencia de transformaciones por la que ha sido obtenido.**





7. EL POLIEDRO superior no puede ser deformado de modo que sus vértices acaben finalmente sobre una esfera y los vértices que inicialmente definían una cara se encuentren en un mismo plano. Los poliedros inscriptibles en una esfera (las soluciones del problema de Steiner) son excepcionales: son los poliedros obtenidos por deformación de poliedros regulares y de prismas rectos. Una noción utilizada para investigar qué poliedros son inscriptibles en una esfera es la de dualidad, una correspondencia entre objetos matemáticos que posee la propiedad de intercambiar entre sí elementos de diferente tipo. La dualidad es una operación involutiva; el dual del dual de un objeto es la entidad de partida. La dualidad utilizada en el caso del problema de Steiner es una transformación en el espacio euclídeo de tres dimensiones. Se toma una esfera fija, y a todo punto del espacio (exceptuado el centro de la esfera) se le asocia un plano, llamado plano polar del punto, como indica la figura *b*: el plano asociado al punto *X* es el conjunto de los puntos *Y* tales que el producto escalar de los vectores *OX* y *OY* sea igual a 1. Al proceder así, los puntos situados en un mismo plano quedan asociados con los planos que pasan por un mismo punto. Por otra parte, los planos polares de los puntos de una recta forman un haz, esto es, pasan todos por una misma recta, llamada recta polar de la inicial. El plano polar de cada punto de la esfera es el plano tangente a la esfera en el punto considerado. La polaridad transforma así un poliedro cuyos vértices se encuentran sobre la esfera en un poliedro cuyas caras son tangentes a ella. Los vértices y las caras se intercambian entre sí; las aristas se transforman en aristas. Así, el dual de un tetraedro sigue siendo un tetraedro, el dual de un cubo es un octaedro y el dual de un dodecaedro, un icosaedro.

truncado es el único poliedro semirregular que no admite plano de simetría (o como dirían los químicos, que es "enantiomorfo").

También resulta difícil preparar programas de ordenador para el problema de Tammes. Todos los programas confeccionados hasta ahora han mostrado ser demasiado lentos para valores grandes de *N*. Los mejores resultados numéricos conseguidos se refieren solamente a valores de *N* menores que 100.

Las pelotas de golf constituyen modelos físicos del problema de Tammes con muchos cientos de huecos. Los huecos reducen el rozamiento del aire sobre las bolas, pues evitan el desprendimiento de la capa límite (la cual reduce la turbulencia que engendra el aire desplazado por la bola). ¿Cómo han repartido estos huecos los fabricantes? ¿Habrán resuelto ellos el problema que tanto atribula a los matemáticos? Un enfoque geométrico del problema sugiere una vía hacia posibles soluciones: dado que el retículo hexagonal regular determina la distribución óptima de círculos en el plano, ¿por qué no tratar de transportarlo a una esfera? La idea, aunque muy natural, no es viable, por ser imposible adaptar un plano a una esfera sin deformarlo. ¿No podríamos imaginar entonces una solución un poco distinta, consistente en situar casquetes del mismo radio (o incluso de radios distintos) de forma que cada casquete toque a otros seis vecinos? También en este caso la respuesta es negativa, sea cual fuere el número *N*.

Tal imposibilidad es consecuencia de una célebre fórmula debida a Leonhard Euler (1707-1783). Consideremos los centros de los casquetes como vértices de un poliedro. Si la distribución fuese hexagonal regular, todas sus caras serían triángulos esféricos y en cada vértice concurrirían tres lados. Como el número de aristas y de caras es, respectivamente, el triple y el doble del número de vértices, la suma alternada del número de vértices, menos el de aristas, más el número de caras, sería nula. Ahora bien, Euler demostró que, en todo poliedro, dicha suma es necesariamente igual a 2; luego la distribución deseada es imposible. Por otra parte, si consentimos que ciertos vértices se encuentren rodeados por sólo cinco triángulos (vale decir, que en ciertos casos excepcionales cada casquete solamente toque a otros cinco), y estando todos los demás rodeados por seis, la fórmula de Euler impone que el número de excepciones sea 12.

El resultado anterior muestra la forma de hallar una disposición cuasióptima de los huecos en una pelota de golf: se sitúan las doce excepciones en los vértices de un icosaedro regular y se rellena cada una de las 20 caras triangulares de este poliedro con una distribución hexagonal regular. Dicha disposición se deforma un poco al proyectarla sobre la esfera, pero si colocamos $n(n+1)/2$ por triángulo, tendremos ubicados $10n(n+1)$ puntos de manera casi perfecta. Esta configuración ha sido patentada por la sociedad *Slazenger*. En las pelotas de golf de dicha marca, si se marcan en color los puntos donde un hueco solamente toca a otros cinco, aparece un icosaedro regular. En las bolas de otras marcas, cuando menos uno de los 12 puntos excepcionales está desplazado; con esta artimaña se consigue eludir la patente.

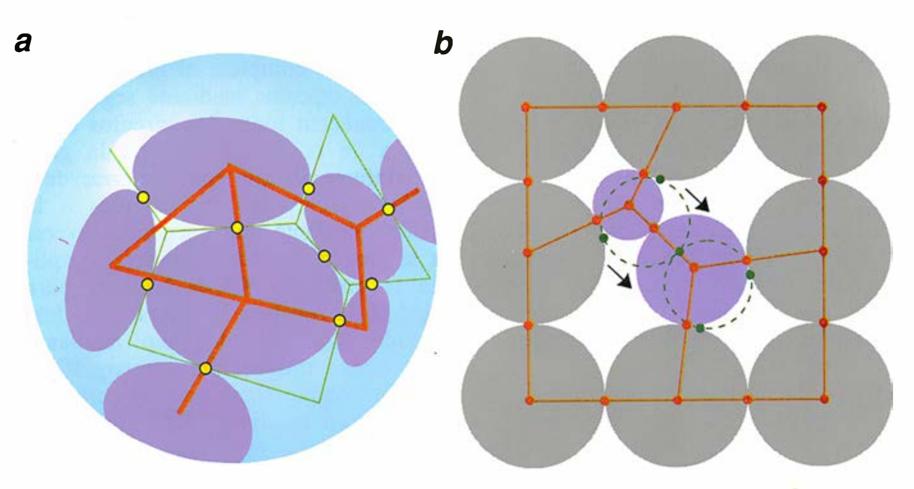
Volvamos a ocuparnos de una de las razones para repartir regularmente puntos sobre la esfera, a saber: el cálculo aproximado del valor medio de una función definida sobre la esfera, cuando solamente se conocen los valores de la función sobre una colección de puntos más y más numerosa (con el fin de lograr aproximaciones cada vez más precisas). Es probable que la distribución "Slazenger" no resulte idónea, pues los doce puntos excepcionales falsean la distribución de puntos en los que se efectúa la medición. Resulta imperativo recurrir a otra técnica.

En 1986, Alexander Lubotsky, Ralph Phillips y Peter Sarnak descubrieron un método sistemático para ubicar más y más puntos sobre la esfera y hacerlo de suerte que se pueda calcular con exactitud creciente el valor medio de una función esférica cualquiera. Su método es bastante general, pero el caso más simple es el siguiente: se toman tres ejes de coordenadas rectangulares en el espacio (*D*, *E*, *F*), y giros en torno a tales ejes de 126° 52′ (ángulo cuyo coseno es igual a –3/5). Se toma un punto cualquiera de la esfera y se ejecutan consecutivamen-

te los tres giros de todas las maneras posibles, un número cualquiera de veces y en el orden que se quiera, al objeto de obtener nuevos puntos. Se puede demostrar que, si el punto inicial se elige al azar con respecto a los ejes, sus imágenes se hallarán "bien repartidas".

Hemos considerado antes una repartición idónea en el sentido de Tammes, pero si el número de puntos es infinito, la definición habrá de comportar un paso al límite. Una sucesión X_1, X_2, X_3, ..., de puntos de la esfera se encuentra uniformemente distribuida sobre la esfera, si para todo casquete C, arbitrariamente elegido, al dividir entre N el número de puntos de índice menor que N contenidos en el casquete, el cociente tiende, cuando N tiende a infinito, hacia la razón del área del casquete al área total de la esfera. La eficacia del procedimiento de repartición se mide por la rapidez de la convergencia, si ésta se da.

La repartición de Lubotsky, Phillips y Sarnak difiere notablemente de la distribución de Slazenger. Valiéndose de la demostración conseguida por Pierre Deligne de conjeturas aritméticas enunciadas por André Weil en 1948, Lubotsky, Phillips y Sarnak han demostrado que su método proporciona la repartición de eficacia máxima. Su trabajo dio ocasión para verificar, una vez más, que las estructuras y conceptos matemáticos más abstractos resultan, paradójicamente, los más naturales, y encuentran frecuente aplicación en otros dominios de la matemática y de las ciencias.



8. EN UNA ESFERA se puede introducir un poliedro cualquiera de forma que cada una de las aristas toque a la esfera en un punto (*puntos amarillos*). Las intersecciones de las caras con la esfera definen círculos sobre ésta (*a*). Al unir los centros de círculos adyacentes se obtiene un grafo (*en rojo*). Todo grafo que defina un tipo de apilamiento puede así quedar realizado sobre la esfera; empero, un grafo dado puede ser realizado de mucha formas. En la figura *b* vemos que los dos círculos centrales pueden ser dispuestos de muchas formas sin que el grafo varíe.

Hemos examinado hasta ahora colocaciones de círculos de igual radio, pero el ejemplo de las bolas de golf nos ha hecho ver que, en ciertos casos, resultaba interesante colocar círculos de radios diferentes. Cabe imponer restricciones de otra naturaleza. Una de las condiciones que han permitido en los últimos tiempos lograr nuevos resultados es la denominada "combinatoria impuesta". Se trata de situar sobre la esfera casquetes de radios arbitrarios, pero cuyas tangencias estén predeterminadas, por ejemplo, de modo tal que cada círculo se encuentre en contacto con otros seis, o con otros cuatro, o que la malla de círculos posea una estructura particular, etcétera.

Para justificar tal problema, empezaremos mencionando una cuestión propuesta por Jakob Steiner (1796-1863). Steiner pretendía averiguar si todo poliedro puede ser inscrito en una esfera, o más exactamente, si dado un poliedro convexo cualquiera, pueden siempre hallarse puntos en una esfera que determinen otro poliedro con igual combinatoria que el primero, vale decir, de manera que los vértices se correspondan dos a dos (y otro tanto las aristas y las caras).

El problema de Steiner permaneció abierto hasta 1927, fecha en que E. Steinitz demostró que el problema rara vez admitía solución. Por ejemplo, el poliedro de la figura 7 no es inscriptible sobre la esfera, pues si colocamos los cinco puntos de la cara superior, deformándola, sobre una esfera, en general no definirán un plano. Al tratar de conservar la planaridad de todas las caras se llega a una imposibilidad. El caso de los poliedros del mismo tipo combinatorio (esto es, con el mismo tipo de tangencia entre los círculos centrados en los vértices) que los poliedros regulares y los prismas rectos es excepcional. Por dualidad (*véase la figura 7b*) existen asimismo poliedros que no pueden quedar circunscritos a una esfera sin que cambie su organización combinatoria. Es imposible que todas sus caras sean simultáneamente tangentes a la esfera (en el problema inicial tratamos de situar los vértices, y los poliedros se hallan inscritos en la esfera).

Ya que no es posible en general inscribir una esfera en un poliedro de tipo combinatorio dado, quizá sí podamos obtener un resultado intermedio entre "situar todos los vértices sobre la esfera" y "conseguir que todas las caras sean tangentes a la esfera". ¿Podremos, pues, lograr que todas las aristas sean tangentes a la esfera? Supongamos el problema resuelto y dibujemos las caras; las intersecciones de las caras con la esfera definen círculos; la forma de que estos círculos sean mutuamente tangentes corresponde a la organización combinatoria del poliedro. Tracemos un arco de círculo máximo de la esfera que una los centros de pares de casquetes tangentes, con lo que obtendremos un grafo. Dicho de otro modo, si pudiéramos enjaular la esfera en todos los tipos combinatorios de poliedros, todo grafo de la esfera podría ser realizado por una colocación de casquetes que tuvieran a tal grafo por sistema de tangencia.

Esta doble posibilidad fue observada en 1980 por William Thurston, quien había comprendido que era consecuencia de un teorema demostrado en 1970 por E. M. Andreev. Por otra parte, Horst Sachs señaló en 1991 que el resultado había sido obtenido ya en 1936 por Paul Koebe, como aplicación de un resultado perteneciente a un dominio totalmente distinto. En la actualidad, las colocaciones de combinatoria prefijada se denominan colocaciones Koebe-Andreev.

¿Cuántas son las colocaciones distintas que satisfacen una organización combinatoria dada? La figura 8b, que describe gráficamente un resultado válido para todas las colocaciones de esferas sobre una esfera, sobre un disco o sobre un plano, muestra que la solución no es, en general, única. No es de esperar que se dé la unicidad sino en el caso de que el grafo asociado presente exclusivamente caras triangulares, porque los radios de los tres círculos determinan los tres ángulos del triángulo. Consiguientemente, en lo que resta de ar-

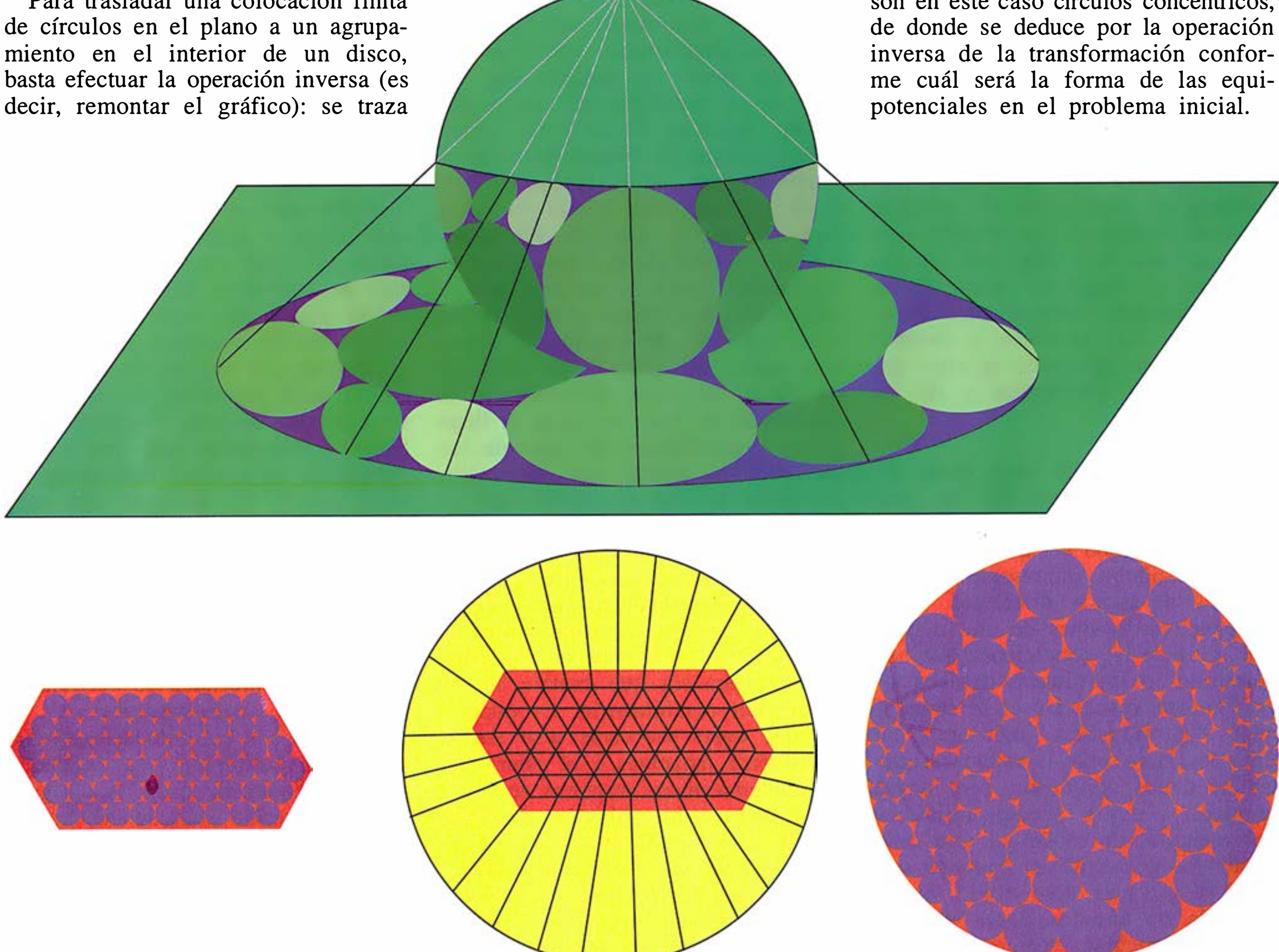
tículo vamos a reservar el término "colocación de círculos" para las colocaciones triangulares. Andreev ha demostrado que toda triangulación de la esfera es realizable mediante una colocación de círculos y que, además, esta colocación es única salvo transformaciones de Möbius (las transformaciones de Möbius, compuestas por una rotación y una o dos inversiones, son las únicas que transforman cualquier círculo en otro círculo).

Hemos colocado círculos en un plano y en una esfera. Tratemos ahora de situarlos dentro de un círculo. La solución de este problema se deduce del de la colocación de círculos en la esfera, pues al efectuar una proyección estereográfica de una colocación sobre la esfera con centro de proyección en el centro de uno de los círculos se obtiene una colocación de círculos en el interior del círculo imagen de la circunferencia límite del casquete de proyección.

Para trasladar una colocación finita de círculos en el plano a un agrupamiento en el interior de un disco, basta efectuar la operación inversa (es decir, remontar el gráfico): se traza un círculo que rodee la colocación plana, y se completa el grafo asociado a los círculos mediante segmentos que conecten todos los círculos exteriores de la colocación con la gran circunferencia que los encierra; después se remontan los círculos a la esfera mediante una operación inversa a la proyección estereográfica, se aplica el resultado Koebe-Andreev para acabar de recubrir la esfera y se desciende otra vez al plano mediante una nueva proyección estereográfica.

¿Qué objeto tiene la colocación de círculos en un disco? Su finalidad es la de efectuar representaciones conformes (transformaciones que conservan los ángulos), que son útiles en electricidad, en aerodinámica, en termodinámica, en hidráulica... En todas las disciplinas mencionadas el problema consiste en hallar una representación del dominio a estudiar que lo transforme isotrópicamente en el interior de un círculo; esto es, no ha de haber direcciones privilegiadas para la transformación en el entorno de ningún punto, de forma que las imágenes de circulitos muy pequeños sigan siendo (aproximadamente) circulares, definición que viene a ser equivalente a la exigencia de que se conserven los ángulos.

Tomemos en electricidad, por ejemplo, un sistema coaxial, esto es, un conductor cilíndrico hueco (no necesariamente circular) a lo largo de cuyo interior corre un hilo conductor. Si los dos elementos conductores se encuentran a una diferencia de potencial dada, ¿cuál será la distribución de potenciales eléctricos entre la superficie cilíndrica y el hilo? ¿Cuáles serán las superficies equipotenciales? Los problemas de esta naturaleza se resuelven mediante la aplicación conforme que proyecta la sección del cilindro y el punto representativo del hilo axial sobre un disco y su centro, respectivamente. Las equipotenciales son en este caso círculos concéntricos, de donde se deduce por la operación inversa de la transformación conforme cuál será la forma de las equipotenciales en el problema inicial.



9. POR PROYECCION estereográfica de una colocación de círculos sobre una esfera se obtiene una colocación en un disco. Para efectuar una tal proyección se elige el centro de un disco y se traza la intersección con un plano exterior a la esfera de las rectas que irradian de este polo y pasan por los puntos de los círculos de la esfera. Para ubicar círculos en un disco a partir de una colocación en un plano, se la rodea con una circunferencia, se unen los centros de los círculos al disco exterior y después se traslada a la esfera el gráfico obtenido por la inversa de la proyección precedente, se determina la colocación de círculos correspondiente sobre la esfera y se proyecta nuevamente en un disco.

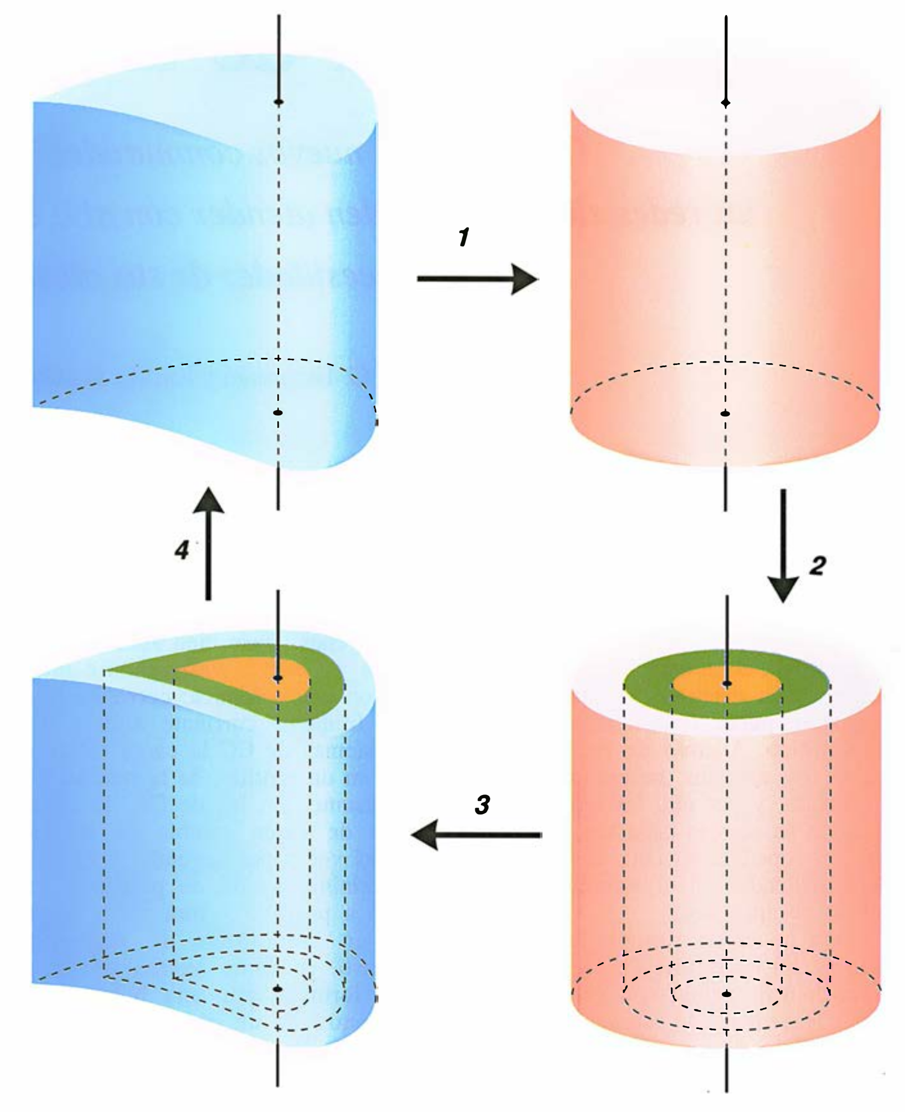
En 1852, Bernhard Riemann afirmó que todo dominio plano sin huecos podía ser aplicado sobre el interior de un círculo mediante una transformación conforme. Riemann no facilitó ninguna demostración de este aserto; diversos matemáticos de la segunda mitad del siglo XIX aportaron demostraciones más o menos sólidas, fundadas en consideraciones físicas. La primera demostración rigurosa de este teorema, que es verdadero para dominios de frontera tan compleja como se quiera ("fractales", por ejemplo), no se consiguió hasta 1902, por Koebe.

Quedaban por determinar, empero, algoritmos eficaces para realizar prácticamente la transformación. Aunque disponemos de ellos desde hace tiempo, ninguno es verdaderamente geométrico, visible. En 1985, William Thurston propuso un método interesante. Se crean en el dominio a representar colocaciones hexagonales de círculos más y más finos. Para cada colocación del dominio se construye en el disco, por el método citado antes, la colocación de círculos que posee idéntica combinatoria. Se fabrica así una aplicación del dominio sobre el disco, enviando los centros de los círculos sobre los centros de los círculos y rellenándolos después de modo afín (los segmentos se transforman en segmentos y las razones de distancias se conservan). Tendríamos así que ir aproximándonos más y más a la transformación conforme de Riemann.

Thurston proporcionó un algoritmo (sin saber si sería convergente) para realizar en cada paso la colocación sobre el disco. Su algoritmo, fácil de programar en un ordenador, proporcionaba rápidamente el aspecto de la representación conforme deseada. En 1987 Burt Rodin y Dennis Sullivan demostraron que las transformaciones construidas con estas yuxtaposiciones convergen hacia la transformación de Riemann. La convergencia del algoritmo para las colocaciones Koebe-Andreev fue demostrada en 1989 por Yves Colin de Verdière a quien debemos también la primera demostración sencilla del teorema propiamente dicho.

Thurston intuyó que, si cada círculo de un disco toca a seis vecinos, a medida que aumente el número de círculos las transformaciones serán más y más conformes. En el disco que aloja tal colocación son los círculos ubicados más hacia el centro los que tienen radios más próximos. Los resultados de este tipo nos retrotraen al punto de partida: las colocaciones en el plano. B. Rodin y D. Sullivan han demostrado que una colocación de círculos cuya combinatoria sea hexagonal y rellene todo el plano es necesariamente una colocación hexagonal regular. Dicho de otro modo, si, partiendo de una colocación hexagonal regular, tratamos de modificar los radios de ciertos círculos, deberemos modificar simultáneamente los radios de todos los demás círculos... con lo que se obtiene una colocación hexagonal regular, aunque de paso diferente.

La idea de Thurston desemboca hoy en multitud de resultados relacionados con la colocación de círculos y el estudio de las aplicaciones conformes. Uno de los más recientes se debe a M. He y a Oded Schramm, quienes han demostrado un caso importante de la conjetura de Koebe, la generalización del teorema de Riemann para el caso de dominios que tienen una infinidad numerable de huecos (es decir, que se pueden contar con los números enteros positivos). No obstante, estamos buscando todavía una conexión conceptual directa, y no meramente intuitiva, entre las aplicaciones conformes y las colocaciones de círculos.



10. LAS TRANSFORMACIONES CONFORMES se utilizan entre otras cosas para determinar las superficies de igual potencial eléctrico o el flujo aerodinámico en torno al ala de un avión. Para calcular estas superficies equipotenciales en el caso de la superficie de revolución que vemos arriba a la izquierda, se deforma el problema mediante una transformación conforme para obtener alrededor del eje un círculo, cuyas equipotenciales son conocidas (son círculos concéntricos). Efectuando entonces la operación inversa, se determinan las equipotenciales del problema estudiado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FINITE POINT-SETS ON S2 WITH MINIMUM DISTANCE AS LARGE AS POSSIBLE. I. Dantzer, en *Discrete Mathematics*, 60, págs. 3-66, 1986.

THE DISTRIBUTION OF POINT CHARGES ON THE SURFACE OF A SPHERE. J. Edmunson, en *Acta Crystallographica A48*, págs. 60-69, 1992.

Electrónica de alta potencia

Gracias a los nuevos conmutadores de silicio las redes eléctricas pueden atender con alta eficiencia y fiabilidad las necesidades de sus clientes

Narain G. Hingorani y Karl E. Stahlkopf

Son muchas las exigencias que se imponen al suministro de electricidad. Las diminutas pastillas de silicio que hoy proliferan en cualquier artefacto de cierta complejidad son en extremo sensibles a las irregularidades de su alimentación eléctrica. La pérdida de energía durante un solo ciclo de la corriente alterna, 1/50 de segundo, puede desactivar un aparato electrónico. Además de reclamar calidad, los usuarios necesitan mayores potencias, y por ello las redes de alta tensión se acercan cada vez más a sus límites operativos, con el riesgo de inestabilidades en el suministro e incluso de apagones.

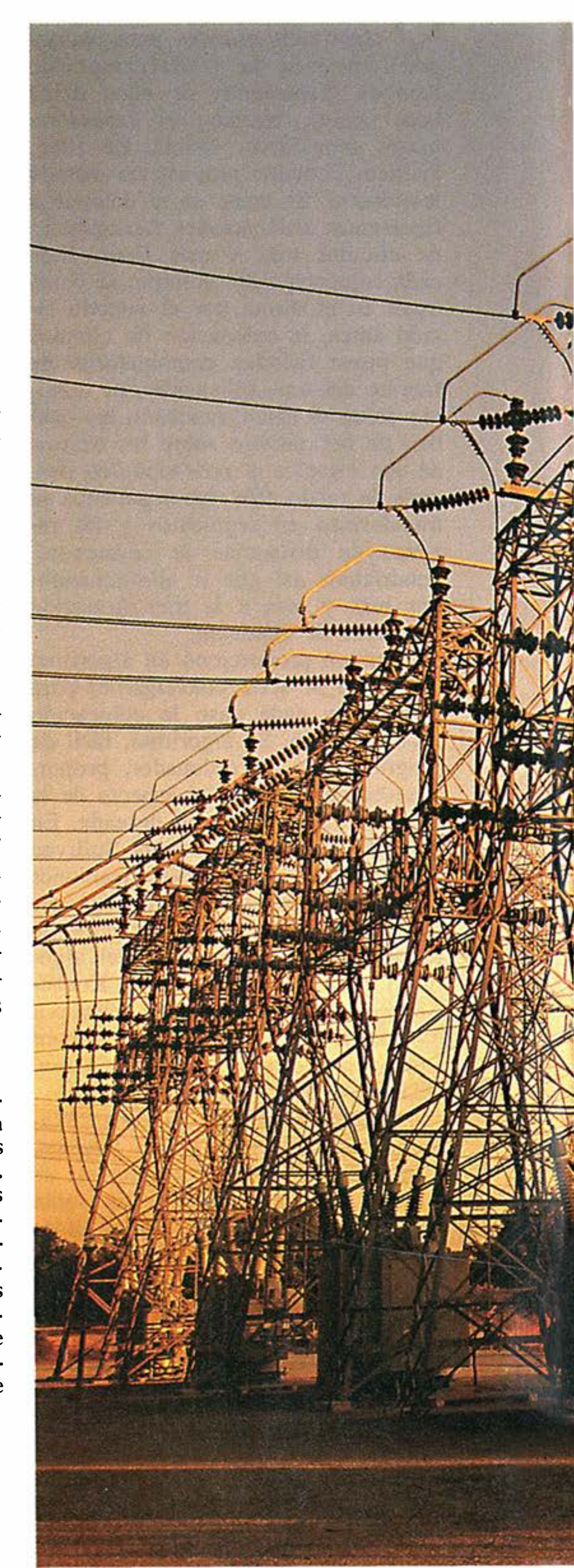
Para no correr riesgos, los responsables del transporte de energía eléctrica han de actuar con extrema cautela. Hacen que la red funcione muy por debajo de su capacidad máxima para que se reduzca la posibilidad de que un aumento súbito e imprevisto de la demanda o una pérdida de capacidad causen sobrecargas que se extiendan por una parte importante de la red eléctrica. Como margen de seguridad ante las contingencias, las compañías deben mantener reservas ingentes de capacidad generadora.

No ayuda mucho el equipo tradicional. Para conectar un generador suplementario, remediar fallos o satisfacer las variaciones de la demanda, se recurre a grandes conmutadores electromecánicos —en esencia, versiones gigantes de los disyuntores caseros— que tardan en abrirse o cerrarse varios períodos de la corriente alterna. Estos conmutadores introducen en el sistema su propio ruido eléctrico, así como nuevos riesgos de inestabilidad. No sirven, pues, para realizar los continuos y delicados ajustes que requiere la plena utilización de la capacidad de transporte de energía.

El desarrollo de conmutadores de silicio para altas tensiones ofrece a las compañías eléctricas una solución con la que atender las necesidades de los usuarios sin que se desboque el coste, que aumenta la calidad y reduce las pérdidas en la transacción.

Los problemas que afectan hoy a los sistemas de transporte de energía recuerdan a los que padecieron en sus orígenes. Hace cien años Thomas Edison y George Westinghouse mantuvieron una polémica: corriente continua frente a corriente alterna. En los sistemas de CC la carga eléctrica fluye en un sentido, de la producción al consumo. En los de CA, la circulación de carga cambia de sentido muchas veces por segundo, y el mismo terminal pasará de potencial negativo a positivo y otra vez a negativo en fracciones de segundo. Producirá corriente alterna un generador formado por una bobina que gire dentro de un campo magnético, puesto que la orientación relativa de la bobina y el campo magnético se invertirá a cada media rotación.

Edison eligió la corriente continua para su primera planta de energía, destinada al alumbrado en 1882. La CC a baja tensión no presentaba riesgos, era fiable y fácil de controlar. Pero ofrecía un rendimiento muy pobre: el bajo valor de la tensión exigía una corriente elevada, y las pérdidas resistivas aumentaban con el cuadrado de la corriente transmitida. De ahí que las centrales eléctricas no pudieran abastecer a usuarios



1. ESTA SUBESTACION ELECTRICA transforma la energía de una línea de larga distancia cuya tensión es de 500 kilovolts a 230 y 115 kilovolts para redes locales. Tales instalaciones y las líneas asociadas funcionan sólo a una fracción de su capacidad porque el equipo de conmutación convencional no reacciona con rapidez a perturbaciones imprevistas. Los dispositivos de estado sólido, que responden antes a cortes o bruscos cambios de tensión, elevarían hasta en un 50 % la capacidad de muchas líneas de transporte y sistemas de distribución.

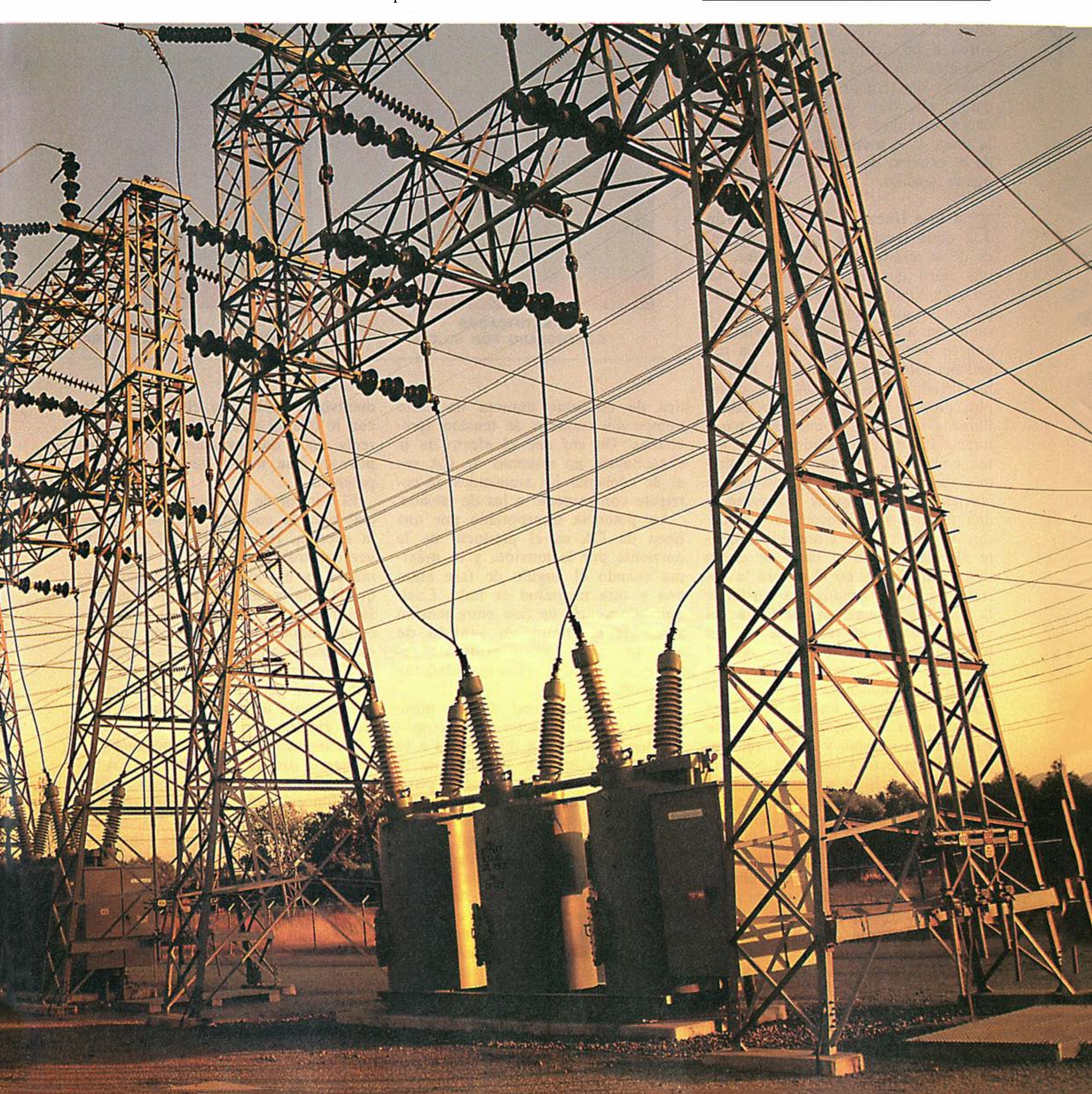
que residieran o trabajasen a más de algunos kilómetros de distancia.

Estas limitaciones incitaron a Westinghouse a apostar por la corriente alterna, susceptible de ser convertida, mediante transformadores, a tensiones elevadas para una transmisión eficiente, y luego de nuevo a voltajes menores, que garantizan una utilización segura. Recuérdese que el transformador consta de dos bobinas o devanados (primario y secundario) tales que el paso de una corriente alterna de determinada tensión por el primario genera otra corriente alterna de distinta tensión a través del secundario; estas tensiones guardan una relación que depende del número de espiras de cada devanado.

Edison advirtió que la corriente alterna comporta mayores riesgos que niveles equivalentes de corriente continua; sin embargo, las ventajas de aquélla quedaron de manifiesto en 1896, cuando una línea de alta tensión empezó a transportar corriente hasta un distrito neoyorquino desde la primera central hidroeléctrica de las cataratas del Niágara.

No obstante, los adversarios de la corriente alterna tenían razón en un punto: la CA es más difícil de controlar que la CC. Las tensiones en la línea tienden a crecer o disminuir de un modo complejo a medida que varían las cargas. Y es más probable que la tensión se desestabilice sin remedio. Tales problemas se deben a

NARAIN G. HINGORANI y KARL E. STAHLKOPF trabajan sobre transporte y distribución de electricidad en el Instituto de Investigaciones de Energía Eléctrica de Palo Alto, entidad de la que Hingorani es vicepresidente y Stahlkopf dirige la división de sistemas eléctricos.



que la CA genera campos eléctricos y magnéticos variables en torno a las líneas que la conducen, y a su vez estos campos influyen en la intensidad de corriente. En el caso ideal, la potencia que transporta una línea de CA consiste en una serie de ondas de tensión y corriente que crecen y disminuyen, cambiando de polaridad 100 veces por segundo con una ley perfectamente sinusoidal.

Cuando las sinusoides que representan la tensión y la corriente con respecto al tiempo en un determinado punto de la línea crecen y decrecen en sincronía, se dice que están "en fase": el ángulo de fase entre ellas es cero. Al conectar un dispositivo a un extremo de la línea, la corriente circula a través de él (realizando un trabajo y desprendiendo calor); este flujo de cargas eléctricas causa una ligera caída de tensión en la línea, y se transporta potencia desde el extremo de mayor tensión al de menor tensión.

En una línea de CC la relación entre tensión y corriente depende de la resistencia de los cables. En una línea de CA, sin embargo, tal relación viene gobernada por la impedancia, una magnitud compleja y semejante a la resistencia pero variable con la frecuencia de la CA. La impedancia altera la intensidad y fase de la corriente. Las bobinas, por ejemplo, poseen la clase de impedancia llamada inductiva, la cual deja pasar intacta la corriente continua pero actúa como una barrera frente a rápidas variaciones de la intensidad de corriente. Si se aplica bruscamente una tensión a un devanado conductor, al principio no circulará corriente alguna, y sólo al cabo de cierto tiempo característico alcanzará la corriente su valor estable. La tensión y la corriente, pues, se desfasan; el voltaje alcanza el valor que vaya a tener a su debido tiempo, pero el aumento de corriente se retrasa. Cuando las sinusoides de la CA comercial atraviesan una bobina (una inductancia), la onda de corriente muestra sus crestas y valles retrasados con respecto a los de la onda de tensión. Además se produce una caída en el valor total de la tensión.

Los condensadores —dispositivos que almacenan la carga eléctrica— presentan una impedancia que se comporta de manera opuesta: apenas dificultan el paso de tensiones de variación muy rápida, pero sí impiden la circulación de corriente continua. Por su carácter de almacenes de carga eléctrica, los condensadores pueden dejar pasar grandes intensidades de corriente durante un corto tiempo sin cambios de tensión apreciables. De ahí que el efecto de la capacitancia en sistemas de CA sea el de adelantar las sinusoides de corriente con respecto a las de tensión.

La potencia transportada por una línea de CA es el producto de la corriente por la tensión, y es máxima cuando el ángulo de fase entre una y otra magnitud es nula. Cualquier diferencia de fase entre tensión y corriente, tanto en sentido de adelanto como en sentido de retardo, disminuye la capacidad de transporte.

En un sistema real de transporte de energía, estos factores se complican todavía más. La impedancia a lo largo de un trayecto depende de la interacción entre los cables y otros equipos, así como de los cambiantes campos eléctricos y magnéticos que genera el flujo de potencia. La impedancia creada por transformadores y motores es inductiva; la que se debe a condensadores y líneas de transmisión largas y poco cargadas, capacitiva. Sin embargo, cuando en reacción a estas distorsiones la potencia transmitida cambia, la magnitud de los efectos capacitivos e inductivos cambia con ella a su vez, con lo que se altera el equilibrio que regía unos milisegundos antes y se provoca una nueva variación de la potencia.

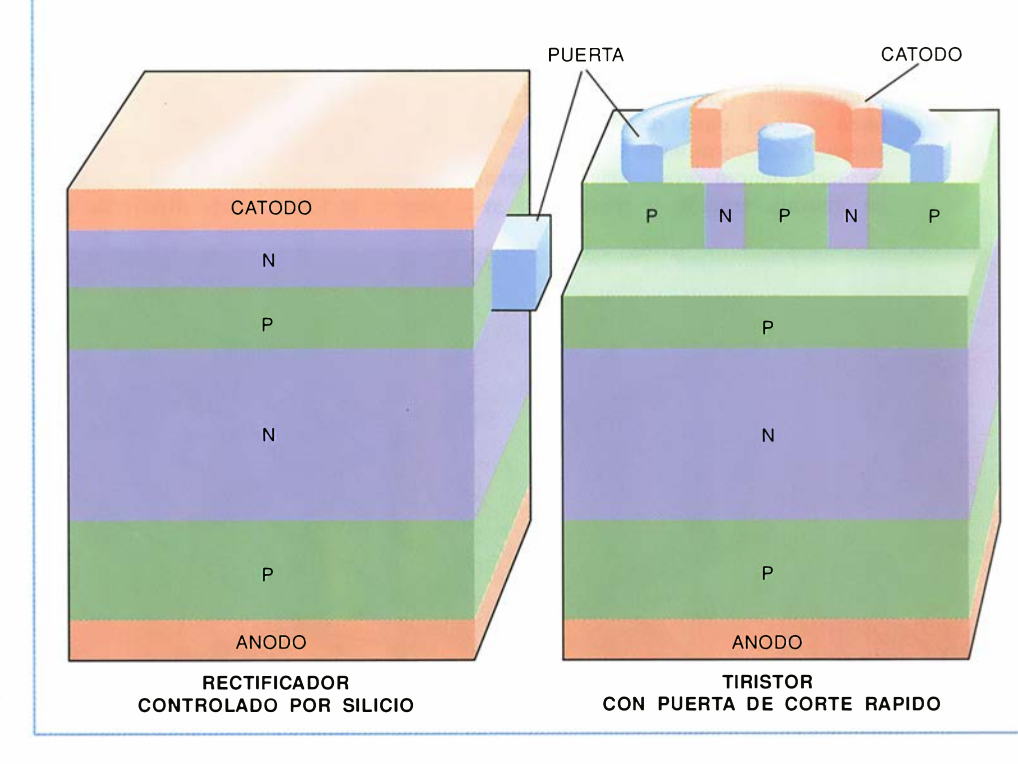
El control de la impedancia, esencial para la correcta distribución de la energía, resulta muy difícil. Una vez construida una línea, un transformador o un motor, su impedancia queda fija y no puede modificarse fácilmente. La inserción en serie de condensadores o bobinas de inducción hace variar en grandes escalones la impedancia de las líneas de transporte, pero este proceso, lento, no se presta a un rápido control del flujo eléctrico.

La interacción entre impedancia y corriente somete las redes de CA a degradaciones de diversa índole: circulación en bucle (circulación de corriente por caminos no deseados), inestabilidad a gran escala (fluctuaciones violentas e incontroladas del flujo de potencia), pérdida de control de la tensión de línea y pequeñas inestabilidades debidas a rápidos cambios en la carga.

La circulación en bucle se produce cuando son múltiples las líneas que conectan la central generadora con la

Así funcionan los tiristores

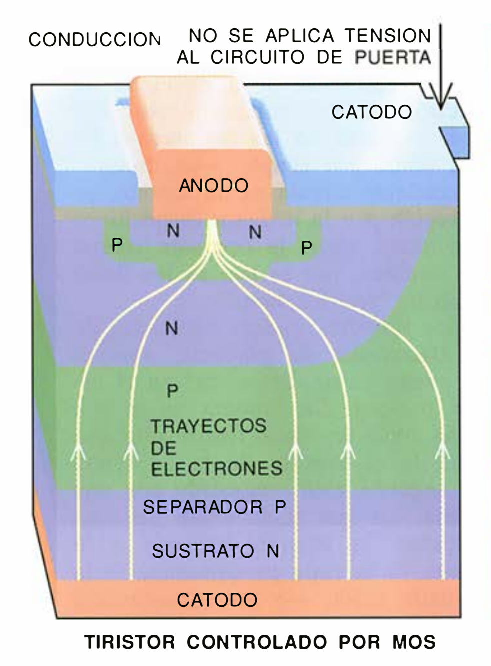
El control de la transmisión de la energía mediante técnicas de estado sólido arranca con el más sencillo de los tiristores, el rectificador controlado por silicio (SCR) (*izquierda*). La tensión positiva aplicada a la puerta del SCR al principio del ciclo de CA le hace conducir mientras la tensión



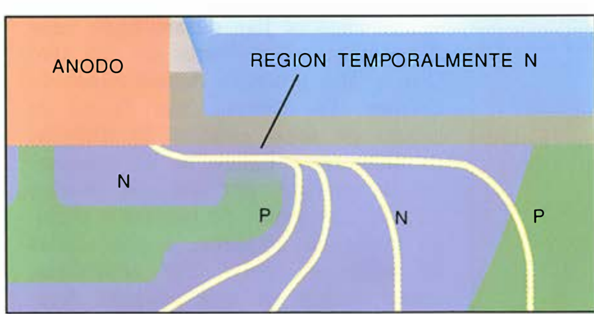
RECTIFICADOR CONTROLADO POR SILICIO

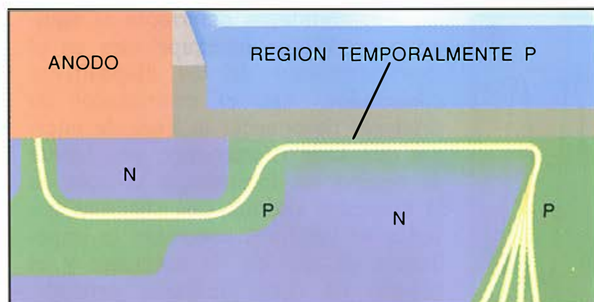
TIRISTOR CON PUERTA DE CORTE RAPIDO

del ánodo supere a la tensión del cátodo (una unión *p-n* conduce siempre que el potencial del lado *p* sea más alto que el del lado *n*). El GTO, tiristor con puerta de corte rápido (*centro*), puede pasar a conducción o corte en cualquier punto del ciclo; si se aplica tensión a la puerta, la corriente se desvía de la unión entre las regiones *p* y *n*, y el dispositivo no puede conducir. El tiristor controlado por MOS (MCT) ofrece eficacia a costa de complejidad (*derecha*). En estado de conducción, circula corriente por la región *p* subyacente al ánodo. Se pasa al estado de corte aplicando tensión a la puerta: el campo eléctrico resultante hace que una pequeña parte del material de tipo *p* se comporte como *n*; entonces la corriente fluye alrededor de la región *p* y se interrumpe la conductividad del tiristor (*extremo derecho, arriba*). Para que el MCT vuelva a conducir, se aplica tensión de polaridad opuesta a la puerta, lo cual hace que una delgada capa *n* actúe como material *p*; la corriente circula por ella hacia la región *p* situada bajo el ánodo y establece las condiciones para una conducción normal (*extremo derecho, abajo*).



TIRISTOR CONTROLADO POR MOS





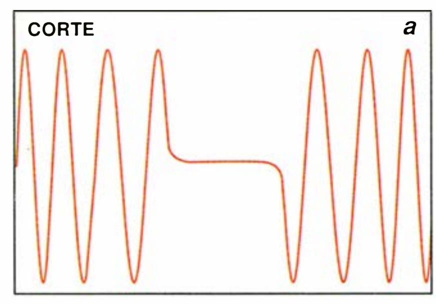
carga —una central hidroeléctrica y un acondicionador de aire en la ciudad, digamos—. En lugar de seguir el trayecto físico más corto, la energía circulará por las líneas que presenten la impedancia más baja. Aunque esta distancia sea geográficamente mayor que el camino "directo", la impedancia hace que sea mucho menor en términos eléctricos. Este rodeo puede acarrear perjuicios económicos a las compañías cuyas líneas transporten la potencia indeseada, ya que la corriente que pasa a través de ellas hacia otro destino está consumiendo capacidad de transporte que de otro modo podría servir para atender a sus propios clientes.

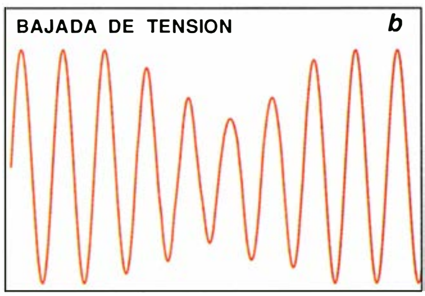
La inestabilidad a gran escala es consecuencia de la manera en que circula la potencia de un punto a otro en las redes de transporte de alta tensión. Si bien la potencia siempre va de las zonas con exceso de capacidad a las zonas donde hay déficit, la cantidad de megawatts que transportan unas líneas determinadas dependerá de la impedancia de las líneas que intervengan y de las diferencias de fase entre las sinusoides de los extremos emisor y receptor. Cuanto mayor sea ésta, tanto mayor será la potencia transferida. Pero si el ángulo de fase se hace demasiado grande, un pequeño desplazamiento de fase podrá originar grandes cambios en la magnitud del flujo. Con ello se desestabiliza el sistema, y se crea una perturbación que puede concluir en un apagón generalizado. Tales inestabilidades se producen en muy raras ocasiones porque las compañías eléctricas limitan la potencia transferida por sus líneas de alta tensión. Si hubiese algún modo de amortiguar las fluctuaciones bruscas, podría aumentarse el valor de la potencia transportada.

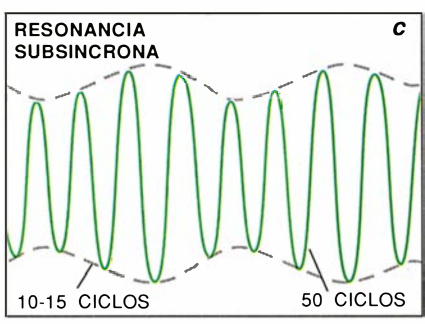
A las dificultades de la regulación del ángulo de fase se suman las que presenta el mantener constante la tensión de la línea. Una fábrica que tenga un gran número de motores potentes aplica una considerable carga inductiva sobre la línea. Esa impedancia inductiva tiende a rebajar la tensión, lo cual puede crear problemas a los demás usuarios conectados al mismo circuito. Por el contrario, las líneas largas con cargas ligeras son propensas a que la tensión suba por encima de los límites aceptables. Por último, las descargas de rayos, los cortocircuitos en las líneas o las repentinas variaciones de carga originan inestabilidades de tensión, que de no estar controladas pueden deteriorar los equipos e incluso producir grandes apagones. Las impedancias inherentes a los sistemas de transporte no tardan en restablecer la tensión en sus valores normales, pero a veces la combinación de capacitancia e inductancia amplifica las subidas o bajadas de la tensión. Y bajo ciertos tipos de perturbaciones periódicas, un sistema de transporte de energía puede caer en una resonancia subsíncrona, en la cual la onda normal de 50 ciclos por segundo es modulada por frecuencias que son submúltiplos de la suya. La interacción entre la frecuencia fundamental y las espurias puede hacer vibrar los generadores con fuerza capaz de partir ejes de acero de un metro de diámetro.

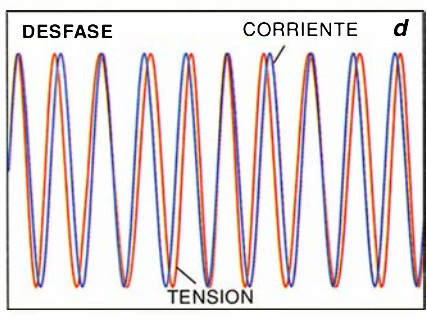
Los efectos en los usuarios de la compleja variedad de fallos en el suministro eléctrico son siempre los mismos: pérdida de trabajo, procesos de fabricación alterados y daños en valiosos equipos; incluso interrupciones brevísimas pueden causar un grave perjuicio económico.

Para evitar tales interrupciones, muchas compañías se hacen con su









2. LOS SISTEMAS de transmisión y distribución por corriente alterna son presa de muy diversos males. Los cortes (*a*), momentáneos o prolongados, rompen los procesos de fabricación. Las bajadas de tensión (*b*) dañan los dispositivos alimentados. La resonancia subsíncrona (*c*) ceba vibraciones que destruyen los aparatos de generación y transporte. Aunque los desequilibrios de fase entre tensión y corriente (*d*) no suelen ser destructivos, reducen la potencia transferible de un lugar a otro y en condiciones extremas causan apagones.

propio equipo de alimentación, que lo mismo puede ser un grupo de suministro ininterrumpido (UPS, del inglés *uninterruptible power supply*), que aporta energía suficiente sólo para cubrir cortos fallos de la red, que un sistema generador completo, capaz de aportar toda la energía de una factoría. Por desgracia, el rendimiento de la tecnología UPS es escaso; se pierde del 10 al 20 % de la energía que fluye por estos dispositivos.

Para escapar del dilema que obliga a escoger entre onerosos cortes de suministro y el derroche de energía, los técnicos han recurrido a los semiconductores. En los últimos veinte años se han desarrollado unos dispositivos electrónicos de alta tensión y alta potencia denominados tiristores. En esencia, son discos de silicio de unos cuantos centímetros de diámetro y menos de un centímetro de espesor, por los que pueden circular corrientes de cientos e incluso miles de ampères, a potenciales de miles de volts. Por añadidura, como actúan en una pequeña fracción de un ciclo de CA, evitan que las inestabilidades deterioren el equipo o produzcan interrupciones en el funcionamiento de los dispositivos conectados. Así, el conmutador de tiristores desconecta la línea de energía que falle o introduce una fuente de reserva sin interrumpir la onda de la corriente alterna. Los sistemas basados en tiristores controlan la impedancia, la tensión, la corriente y el ángulo de fase mediante procedimientos inabordables para los conmutadores mecánicos.

Al permitir incrementar la carga de las líneas, limitada hoy, entre otras cosas, por el riesgo de que se formen bucles y se pierda estabilidad, los tiristores aumentan la flexibilidad de las redes de transporte. En algunos casos, estos controladores duplican la capacidad de arterias de transporte esenciales, con lo cual puede posponerse la construcción de nuevas líneas y centrales generadoras. El Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI, del inglés *Electric Power Research Institute*), organismo creado por las compañías eléctricas de EE.UU. y varias empresas internacionales, ha acuñado el término "FACTS" ("flexible AC transmission system", sistema flexible de transporte de CA) para referirse a la extensa gama de aplicaciones de los circuitos con tiristores.

Al igual que los transistores y circuitos integrados convencionales, los nuevos dispositivos de alta potencia dependen de las propiedades conductoras del silicio cristalino dopado con impurezas. En un transistor típico, dos capas de silicio dopado con fósforo u otros elementos capaces de donar electrones libres (regiones *n*, negativas) están separadas por una capa contaminada con boro u otro material que acepte electrones libres (región *p*, positiva). La capa *p* variará su conductividad si se le aplica una pequeña tensión y, por tanto, dejará pasar o no corriente de una capa *n* a la otra.

En general, una unión entre materiales de tipo *n* y de tipo *p* conduce corriente cuando se aplica tensión positiva a la región *p* y negativa a la *n*. Los electrones llevan la corriente en las regiones *n*, y los "huecos", positivamente cargados, cada uno de los cuales representa la ausencia de un electrón de su emplazamiento normal, lo hacen en las regiones *p*. En una unión *p-n* simple —un diodo— la corriente circula en un sentido, de la región *p* a la *n*. Estos dispositivos convierten, pues, la corriente alterna en continua, por lo que se les llama también "rectificadores".

Los tiristores, piezas esenciales de la electrónica de potencia, constan de cuatro capas, dispuestas en el orden *p-n-p-n*. La primera unión *p-n* actúa como un diodo rectificador que controla el sentido de la corriente. La segunda está controlada por una puerta, así que actúa como un conmutador: la tensión aplicada a la puerta (a la capa *p*) determina si la segunda unión —y en consecuencia el dispositivo entero— conduce o no. La forma más sencilla de tiristor, el rectificador controlado por silicio (SCR, del inglés *silicon-controlled rectifier*), pasa a conducir en su totalidad cuando se aplica una tensión positiva a su electrodo puerta —y con ello a la capa *p* enterrada— en caso de que la de la capa *p* superficial sea también positiva. Este rectificador no dejará de conducir, cualquiera que sea la tensión de la puerta, hasta que la tensión de capa *p* superficial vuelva a cero.

Un paso más en el desarrollo del dispositivo es el tiristor con puerta de corte rápido (GTO, del inglés *gate turn-off*), capaz de interrumpir la corriente en cualquier punto del ciclo de CA. Contiene una segunda capa *n* formada por numerosos canales, todos ellos embutidos en la capa *p* adyacente. A su vez esta capa *p* está controlada por un electrodo puerta, también dividido en canales múltiples. Si se aplica una tensión negativa a la puerta, la corriente se aparta de los canales *n* y, por tanto, deja de circular por el dispositivo entero.

Los GTO no dan, sin embargo, buen rendimiento porque hacen pasar la corriente por muchos canales estrechos. Tampoco son baratos. Por ello se han investigado otros diseños de conmutador, cuyas corrientes de control sean mucho menores y que pasen más deprisa del estado de conducción

al de corte. Uno de ellos es el tiristor controlado por MOS, el MCT (del inglés *MOS-controlled thyristor*). Consiste este dispositivo en unos circuitos integrados MOS ("metal oxide semiconductors", semiconductores metal-óxido) grabados en la cara superior del silicio que forma el cuerpo principal del tiristor. La tensión aplicada a la puerta del circuito MOS crea un campo eléctrico que refuerza la conductividad de la capa *p* enterrada, lo que permite circular la corriente. Empiezan a comercializarse versiones para uso industrial que sólo pueden controlar 120 kilowatts, y no se espera disponer de MCT para grandes redes eléctricas antes de 1997.

Pese a la clara superioridad teórica de los FACTS sobre los lentos conmutadores electromecánicos que hoy gobiernan las líneas de alta corriente y alta tensión, las compañías esperan a que la eficiencia de la tecnología de estado sólido compense su coste para adoptarla a escala más general. El EPRI persigue ahora el uso de controladores FACTS en varias aplicaciones esenciales: en primer término, el plan de amortiguamiento subsíncrono en estado sólido; luego viene el sistema de condensador variable controlado por tiristor, que reduce la impedancia de las líneas de transporte y con ello regula y aumenta el flujo de potencia; los reguladores de acción rápida serán capaces de impedir las fluctuaciones de tensión en líneas muy cargadas; por último, el EPRI promueve el uso de reguladores de ángulo de fase con el fin de reducir la potencia en aquellas líneas de transporte que sufran sobrecargas debidas a la circulación en bucles. También pueden emplearse para aumentar la potencia que transportan las líneas infrautilizadas.

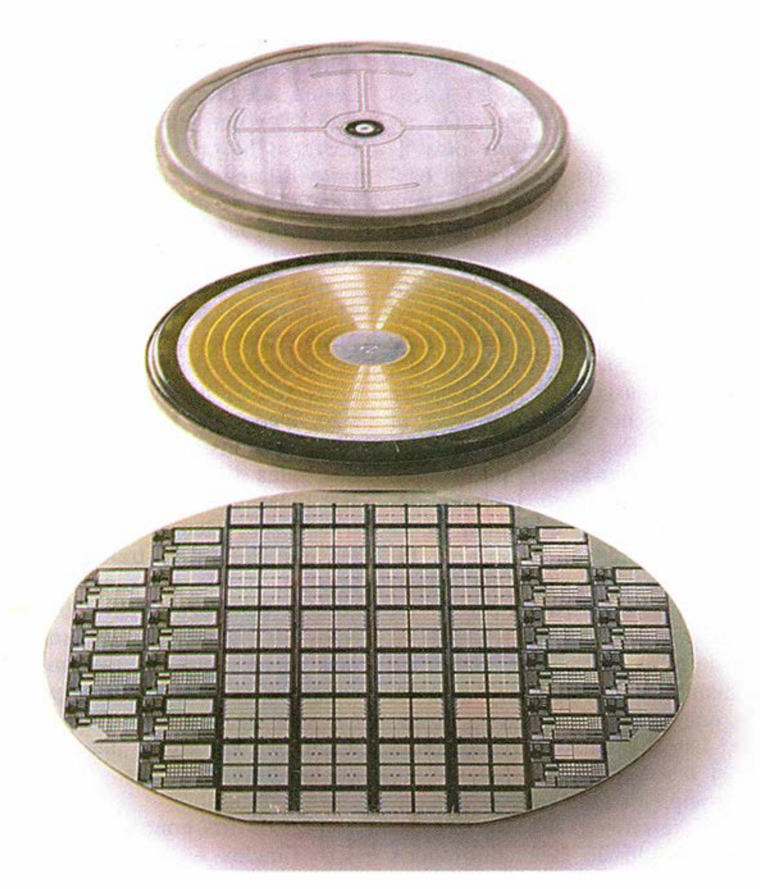
La reducción de la impedancia en una línea con series fijas de condensadores —con una gran capacitancia, pues— tiene el inconveniente de aumentar la vulnerabilidad a la resonancia subsíncrona —vibraciones de baja frecuencia que pueden dañar los generadores u otros equipos—. Se conjura este riesgo mediante los condensadores en serie controlados por tiristor (TCSC, del inglés *thyristor-controlled series capacitor*). Cuando la potencia fluctúa, el tiristor puede variar el período durante el cual el condensador está incorporado al circuito. De este modo, el dispositivo controla la impedancia y amortigua la resonancia indeseable.

En 1978 el EPRI probó sistemas de tiristores para control de tensiones y amortiguamiento de oscilaciones en líneas de energía. En 1985 instaló otro sistema contra las oscilaciones subsíncronas en una línea a 500 kilovolts. En ambos casos se aumentó un poco la capacidad de transporte.

En 1991, dentro del programa FACTS, se probó un conmutador de tiristores en un banco de condensadores en serie colocado en una línea de 345 kilovolts. Posteriormente, se ha instalado un sistema similar en el punto medio de una línea de 300 kilómetros de longitud a 230 kilovolts; de esa forma ha conseguido elevar de 300 a 400 megawatts la potencia que transporta. Bajo el patrocinio del EPRI, se acaba de completar un sistema TCSC mucho mayor en una línea de transmisión a 500 kilovolts y con capacidad de 2500 megawatts. La instalación consta de múltiples secciones de condensadores, muy pequeñas, cada una de ellas provista de su propio controlador de tiristor para ajustar la capacitancia al nivel exacto deseado. Se espera que este sistema incremente la capacidad de transporte durante las crestas que se producen en primavera. El coste de una instalación de este tipo podría recuperarse en menos de un año; además, el controlador, de diseño modular, se adapta fácilmente a otras líneas de energía.

En cuanto empiece a funcionar este sistema de capacitores controlados por tiristores, se realizarán pruebas para determinar si un estricto control de la capacitancia amortigua realmente la resonancia subsíncrona.

El siguiente proyecto del EPRI dimana de las técnicas de regulación del voltaje. Si se añade una capacidad o una inductancia se puede mantener la tensión dentro de límites aceptables en el caso de bajadas o subidas desestabilizadoras. Para ello se utilizan hoy conductores derivados de la línea a tierra a través de un condensador o una autoinducción —un dispositivo de este tipo recibe el nombre de SVC—; el paso de corriente por esos elementos se controla mediante conmutadores de tiristor (SCR). Estas sencillas derivaciones (shunts) no bastan para compensar descensos de la tensión por debajo del 80 % de los valores normales.



3. ESTAS TRES GENERACIONES de tiristores muestran el progresivo aumento en complejidad y capacidad logrado. El rectificador controlado por silicio de la primera generación (*arriba*) corta la potencia solamente al principio de un ciclo de CA; los de puerta de corte rápido (*centro*) pueden conmutar en cualquier punto del ciclo; los controlados por MOS (*abajo*) conmutan mucho más aprisa y consumen bastante menos potencia.

Merced a un nuevo tipo de derivación, basado en tiristores GTO, pueden compensarse las variaciones de tensión mejor que con los actuales dispositivos SCR. En lugar de variar simplemente la capacitancia e inductancia de la derivación (o "shunt"), este "conmutador estático" emplea un condensador de corriente continua que envía a la línea de transporte impulsos de voltaje sincronizados a la perfección para elevar su potencial al nivel correcto. El GTO conecta el condensador a la línea y lo desconecta a continuación, con lo que se produce un impulso, y repite la operación 48 veces en un solo período de la corriente alterna. También puede disminuir la tensión de una línea inyectándole impulsos en oposición al ciclo normal de las sinusoides.

Se está construyendo un condensador estático basado en GTO que deberá funcionar en 1995; regulará la tensión en una línea de 500 kilovolts y en dos de 161 kilovolts, conectadas por grandes transformadores. No permitirá que crezca la tensión de la de 500 kilovolts, que tiende a subir cuando la carga es escasa, y tampoco dejará que descienda en la de 161 kilovolts durante las crestas de servicio. Además, contribuirá a amortiguar las oscilaciones de tensión en las líneas contiguas de otra compañía. De no ser así, habría que construir otra línea de 161 kilovolts, a un coste bastante más elevado, para que esa zona de la red de energía tenga un adecuado margen operativo.

Se espera también que los condensadores estáticos sean de utilidad en las redes de distribución, donde proporcionarán potencia fiable y de alta calidad a los usuarios. Actualmente las compañías no pueden equipar al usuario con dos acometidas independientes y redundantes, puesto que un disyuntor mecánico tardaría demasiado tiempo en conmutar a la segunda acometida si la primera fallase. Pero un dispositivo de estado sólido hace esta transferencia en un solo período de la CA. Durante el tiempo de transición, un regulador de GTO mantiene la tensión constante, con lo que el equipo no nota efecto alguno. Estos reguladores funcionan ya en el laboratorio.

Más complejos todavía que los condensadores estáticos son los reguladores de ángulo de fase controlados por tiristor (TCPR, del inglés *thyristor-controlled phase angle regulator*), que ya se vislumbran. Constan de un gran transformador equipado con un devanado extra, cuya misión es derivar tensión y reintroducirla luego con distinto ángulo de fase respecto a la corriente. El valor preciso de ese ángulo de fase determina el retardo o adelanto de la corriente frente a la tensión. Su variación permite regular la cantidad de potencia que se transfiere de un extremo a otro de la línea. Los tiristores controlan el flujo eléctrico que atraviesa ese devanado suplementario, y se fija así la relación de fase entre tensión y corriente en la energía transportada.

Se proyecta una demostración del TCPR: el objetivo sería controlar el flujo de energía en una línea de 115 kilovolts que conecta dos redes y muestra inversiones estacionales típicas: la energía va de sur a norte en verano y de norte a sur en invierno. Pero la conexión entre las redes es débil, y las tensiones en una de ellas pueden llegar a estar muy desfasadas con respecto a las de la otra. Si se quiere aumentar la capacidad de transporte —100 megawatts— de esa línea, habrá que controlar directamente el ángulo de fase; de otro modo, los desequilibrios de fase provocados por las alteraciones de la tensión en una u otra red acarrearán muy pronto sobrecargas.

Concretamente, el TCPR protegería esa línea de interconexión de bruscos aflujos de potencia procedentes de cortes accidentales en una línea de 500 kilovolts vecina. Podría entonces elevarse hasta 150 megawatts el límite de seguridad del transporte. El regulador de ángulo de fase ayudaría a amortiguar las oscilaciones en baja frecuencia.

Hay fabricantes que, movidos por el mercado presumible, desarrollan otros tipos de controladores basados en tiristores. Quizás el más vulgar de ellos sea el disyuntor de estado sólido. Dado que todavía no son aptos para la transmisión de altas tensiones, tales disyuntores se utilizarán en las redes de distribución local, que transportan cientos de kilowatts, antes que en las de transmisión a alta tensión, donde las potencias son de cientos de megawatts. Estos dispositivos de estado sólido son mucho más rápidos que los mecánicos, y su duración es muy superior puesto que carecen de contactos sujetos a desgaste por los arcos que se producen en las desconexiones.

Uno de los controladores más refinados es el de reactancia en serie controlada por tiristor (TCSR, del inglés *thyristor-controlled series reactor*), semejante al TCSC, pero inductivo en vez de capacitivo. Añade impedancia para reducir la carga en la línea o limitar la corriente en caso de un fallo súbito. Al igual que al TCSC, al TCSR se le hace funcionar en microsegundos. Ambos controladores unidos ofrecen una alternativa a los reguladores de ángulo de fase más económica que éstos. La demostración práctica del TCSR se ha previsto para finales de los años noventa.

Entre tanto, cabe utilizar resistencias de frenado controladas por tiristor para proteger de una repentina pérdida de carga a los generadores que suministren energía a líneas de gran longitud. Sin protección, el generador que alimente una línea en vacío se acelerará hasta sufrir una avería o ser desconectado. Es cierto que también pueden frenarse los generadores por inserción mecánica de resistencias, pero estos artilugios nunca han sido bien acogidos por los técnicos: su operación es brusca. Los controlados por tiristor, sin embargo, se aplicarían gradualmente cuando se requiriese un ligero frenado, y de manera tajante ante una emergencia. Se espera que antes de finalizar la década se haya probado un prototipo de tales dispositivos.

También ofrece buenas perspectivas el filtro activo controlado por tiristor, cuyo objetivo es más la calidad que la fiabilidad de la energía. Los equipos eléctricos pesados a menudo producen armónicos de orden superior —fluctuaciones de tensión a frecuencias múltiplos de 50 ciclos por segundo—, que se retroalimentan en la red de energía y producen interrupciones. Para evitarlo, en las líneas expuestas a armónicos se utilizan filtros pasivos, que dejan sólo pasar determinadas frecuencias. Lo malo es que estos filtros añaden impedancia a la línea y, por tanto, desperdician energía. Por el contrario, los filtros activos serían capaces de detectar los armónicos y de aplicar una tensión opuesta, en tiempos determinados con precisión, que los neutralice. Todo ello, empero, no ha pasado de la fase de laboratorio.

Tomados en conjunto, los diversos tipos de dispositivos de silicio para altas potencias ofrecen a las compañías eléctricas un control como jamás se había logrado sobre el transporte y la distribución de energía.

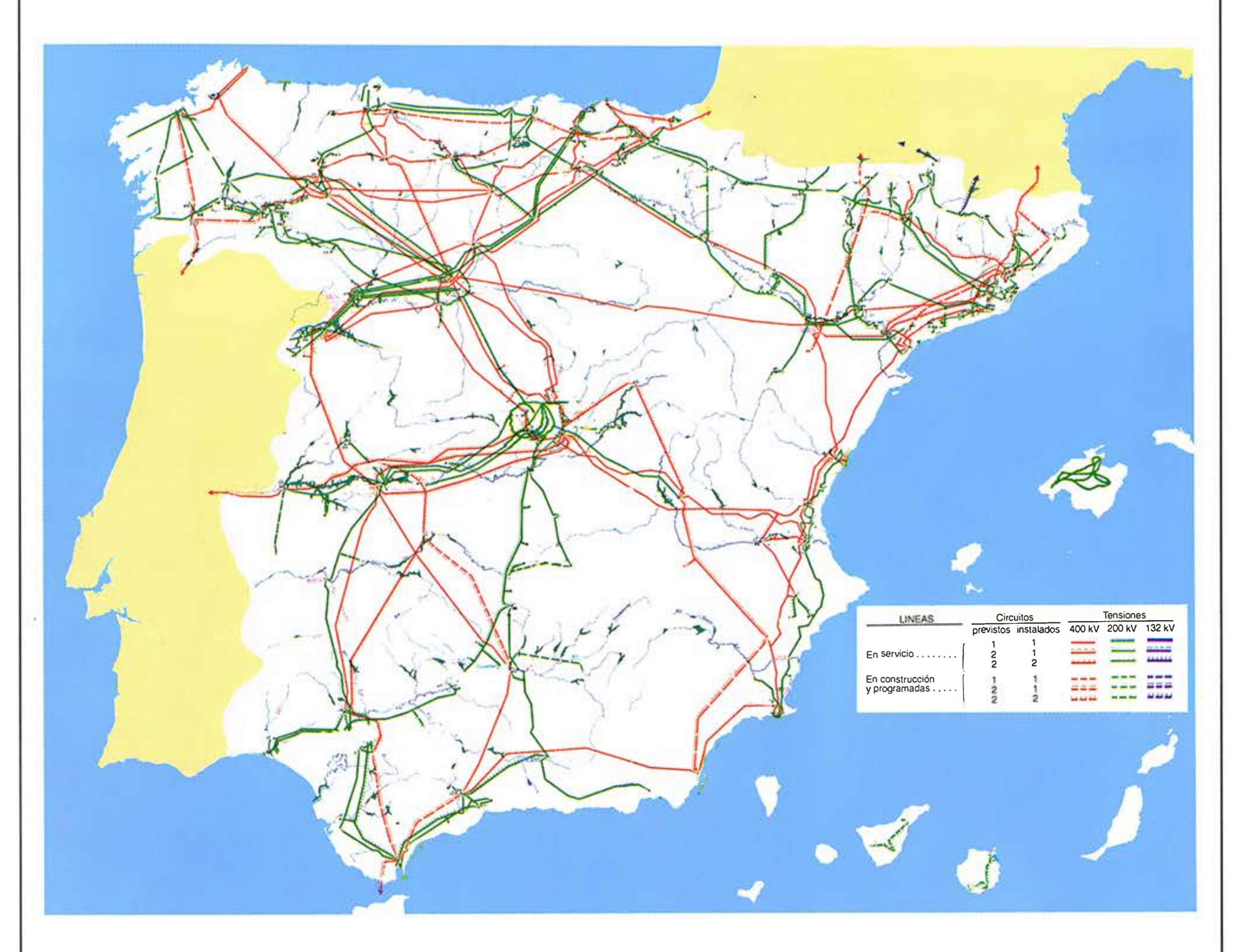
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FACTS: THE DELIVERY SYSTEM OF THE FUTURE. J. Douglas en *EPRI Journal*, volumen 17, número 7, páginas 4-11; octubre de 1992.

FLEXIBLE AC TRANSMISSION. N. Hingorani en *IEEE Spectrum*, vol. 30, número 4, páginas 40-45; abril de 1993.

Red de transporte de energía eléctrica de España

Situación a 1 de enero 1993 y programada para 1993-1997



España produjo en 1992 un total de 138.700 gigawatts-hora de energía eléctrica. Hubo además intercambios de energía con Andorra, Portugal y Francia; predominaron la exportación en los dos primeros casos y la importación en el último. En ese mismo año se alcanzaron máximos históricos de 499,6 gigawatts-hora en la demanda diaria y de 25.214 megawatts en el consumo.

La red nacional de transporte de energía que interconecta todos los medios generadores y las redes de distribución local está, al contrario que las centrales de energía, en unas solas manos: Red Eléctrica de España (REE) es la sociedad que la planifica, construye y explota.

REE ha emprendido, juntamente con la compañía Iberdrola y la multinacional ABB (Asea-Brown Bovery), el proyecto FLESIS (Sistemas Flexibles). El objetivo de FLESIS es el estudio de la aplicación de los dispositivos FACTS, especialmente en las redes de transporte y subtransporte. Para ello se estudian los actuales FACTS, principalmente los SVC (compensadores estáticos controlados por tiristores) y los TCR (reactancias controladas por tiristores); se están desarrollando modelos de ordenador que los representen en los análisis de funcionamiento de la red. Esto conducirá a definir los FACTS más idóneos para la red española, bien sean los existentes o bien nuevos diseños abordables desde esta tecnología. Con todo ello se pretende un control en tiempo real de la impedancia de las líneas y del ángulo de fase, cual requiere la alta disponibilidad y flexibilidad de operación de un complejo sistema de transporte de energía.

Otro importante proyecto de investigación tecnológica aplicada a la red eléctrica de alta tensión española es el llamado AMAS-500, en el que junto a REE participan ASINEL (Asociación de Investigación de las Industrias Eléctricas), Iberdrola y Unión-Fenosa. Su finalidad es el desarrollo de dispositivos capaces de almacenar energía en el campo magnético de una bobina superconductora y de devolverla luego al sistema eléctrico cuando sea necesario —por ejemplo, para amortiguar las oscilaciones de la potencia en la línea de transporte—. Estas bobinas, genéricamente denominadas SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*, almacenador superconductor de energía magnética), están constituidas por un material superconductor y se alimentan con corriente continua mediante un convertidor continua/alterna bidireccional controlado. Su resistencia casi nula hace que el proceso de carga y descarga de la bobina, capaz de almacenar 500 kilovolts-ampères, se realice con un rendimiento muy elevado. El desarrollo de AMAS-500, que se extiende hasta 1996, irá descubriendo y confirmando otras potenciales aplicaciones de esta tecnología en la red de transporte española.

ADN prehistórico

De restos vegetales y animales pertenecientes a especies extinguidas se recupera información genética que parecía perdida para siempre. Gracias a ello podemos abordar el estudio directo de los cambios evolutivos

Svante Pääbo

Buena parte de lo que sabemos sobre los procesos moleculares que explican los cambios evolutivos proviene de la comparación entre genes de especies vivas. De sus diferencias, los biólogos moleculares que laboran en el campo de la evolución infieren los cambios históricos que han originado las secuencias actuales de ADN. Pero, por su propia naturaleza, esos estudios son provisionales. A diferencia de lo que ocurre con los restos vegetales y animales, las moléculas de ADN no quedan impresas en roca. De ahí que los biólogos creyeran vana la esperanza de contrastar algún día sus conclusiones con los registros fósiles, banco de prueba de los paleontólogos.

Pero en los últimos años los científicos han comprobado que el ADN prehistórico, aunque esté degradado, puede sobrevivir a los estragos del tiempo, y los biólogos moleculares han puesto a punto métodos para multiplicar pequeñísimas cantidades de ADN prehistórico (o fósil, como se le ha llamado también). Ya se ha determinado la secuencia de algunos fragmentos de ADN procedente de huesos y tejidos blandos de siete mamíferos extinguidos. El más antiguo es el mamut lanudo —un cadáver congelado encontrado en el permafrost siberiano—. En la actualidad siguen su curso muchos estudios de este tipo. Se intenta también descifrar ADN extraído de insectos atrapados en ámbar desde hace millones de años. Todo ello nos permitirá bucear en las relaciones genéticas que existían entre especies ya extinguidas.

Animado por esta línea de investigación, el Museo de Historia Natural de Londres creó un laboratorio de biología molecular específico. La Institución Smithsoniana de Washington, el Museo metropolitano de Historia Natural de Nueva York y otros centros similares se han sumado al ejemplo británico.

En mis tiempos de doctorando en Upsala, a principios de los ochenta, me di cuenta de cuán sencillo resultaba estudiar secuencias de ADN humano y de otros organismos con las nuevas técnicas moleculares. Y me pregunté si tales técnicas podrían utilizarse para obtener información de las pieles de animales y momias humanas que tanto abundan en los museos. Tras un barrido bibliográfico comprobé que nadie se había planteado la cuestión, y me lancé a la búsqueda de muestras con las que poner a prueba mi idea.

No era fácil conseguir materiales. Para extraer el ADN, había que destruir parcialmente muestras arqueológicas de extraordinario valor. Con todo, mi proyecto despertó el interés de los conservadores de antigüedades egipcias de la Universidad de Upsala, quienes me suministraron pequeños fragmentos de piel y músculo de momias. Y lo que fue más importante, ellos mantenían excelentes relaciones con un gran museo del entonces Berlín comunista.

Pasé cuatro días con el director de los museos estatales de Berlín, hurgando entre momias, algunas de las cuales habían sufrido daños parciales durante la segunda guerra mundial. Con un escalpelo esterilizado conseguí algunos gramos de tejido de las 23 momias que parecían mejor conservadas.

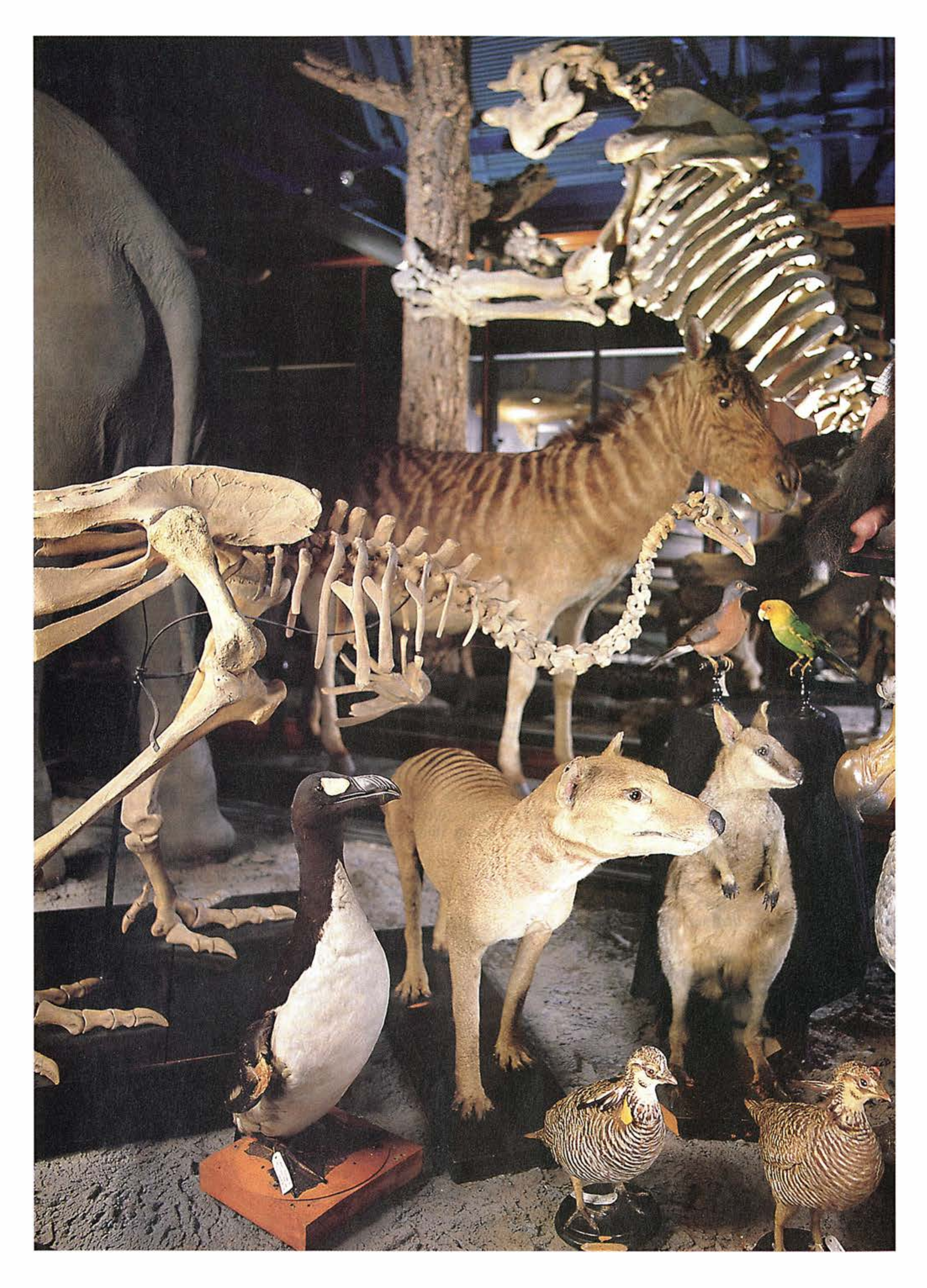
De vuelta a Upsala, me dispuse a estudiar los tejidos, trabajando noches y fines de semana, para no entorpecer mis investigaciones en virología molecular, lo que se suponía iba a ser mi futura tesis doctoral. Empecé por la observación de las muestras al microscopio. Hallé grandes diferencias en el estado de conservación. La mayoría de los tejidos aparecían muy degradados, pero había excepciones. Las partes superficiales y periféricas, como la piel de los dedos de ambas extremidades, se habían conservado mucho mejor. En esos tejidos había núcleos que se teñían con colorantes que revelan la presencia de ADN; parecía ello deberse a que las enzimas que digieren tejidos moribundos, un proceso designado autólisis, requieren agua. Los tejidos superficiales podrían haberse secado antes de que se produjera la degradación postmórtem del ADN.

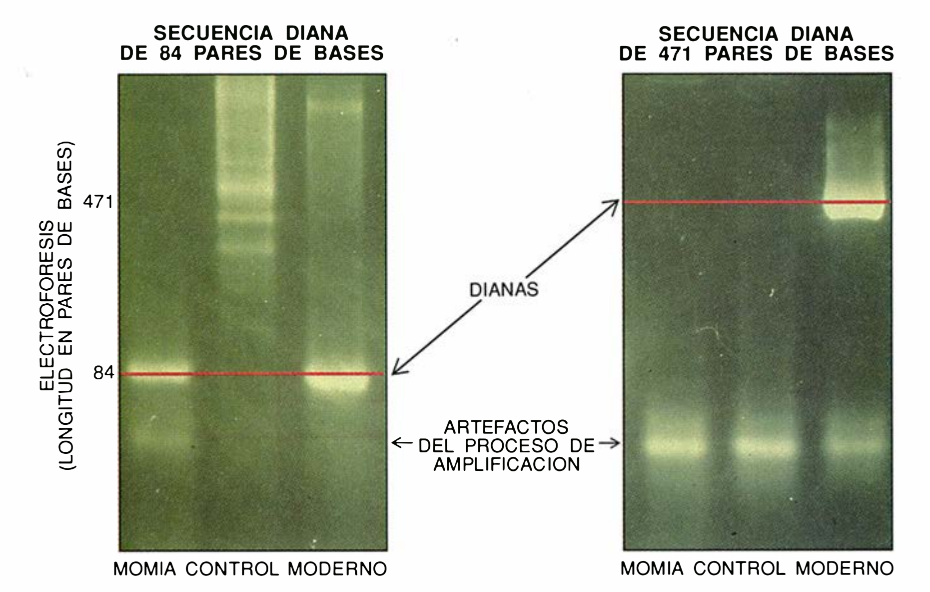
Con ilusionado entusiasmo, me dispuse a extraer ADN de los tejidos que contenían núcleos celulares. Procedí como si de un tejido moderno se tratase, eliminando las proteínas mediante el ataque enzimático, y empleando disolventes para extraer el ADN de azúcares, proteínas y lípidos. Analicé el ADN por electroforesis, una técnica que utiliza un campo eléctrico para separar fragmentos de ADN en su desplazamiento a lo largo de un gel. Cuanto menores son los fragmentos tanto más avanzan, una correlación que permite calcular su tamaño respectivo.

Los resultados mostraban que el ADN se había degradado en fragmentos de

SVANTE PÄÄBO enseña biología en la Universidad de Munich. Estudió egiptología, medicina e historia de la ciencia en la Universidad de Upsala, donde obtuvo su doctorado en inmunología molecular en 1986. Después trabajó en Zurich y, durante cuatro años, en el laboratorio de Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley. Sus investigaciones actuales, sobre ADN prehistórico y moderno, se centran en la historia evolutiva y en los procesos moleculares que subyacen bajo los cambios genéticos. En 1992, la Fundación Alemana de la Ciencia le concedió el premio Leibniz.

1. PIEL Y HUESOS suministran datos genéticos de extraordinario valor sobre especies ya extinguidas, como el cuagga (*animal parecido a la cebra, en el centro*), la moa (*esqueleto, en primer plano*) y el tilacino o lobo marsupial (*a su lado*).





2. ADN EXTRAIDO DE MOMIAS, del que sólo se pueden multiplicar fragmentos cortos. Los controles muestran la ausencia de ADN humano contaminante, pero detectan artefactos debidos a la multiplicación.

sólo 100 o 200 pares de bases (los cuatro nucleótidos que constituyen las unidades básicas del ADN). Por mor de comparación, el tejido fresco produce fragmentos de ADN de más de 10.000 pares de bases.

Para estudiar la información genética presente en tales fragmentos de ADN, hay que multiplicarlos. En aquel entonces, la única forma de hacerlo era la clonación molecular. Con ese procedimiento, podíamos fusionar el ADN prehistórico con una molécula de ADN transportadora dotada de capacidad para autorreplicarse dentro de una bacteria. La molécula híbrida se introduce en la bacteria y se pueden conseguir miles de colonias bacterianas, en cada una de las cuales se ha multiplicado uno solo de los fragmentos del ADN original.

Se analizan, luego, las colonias bacterianas para ver si contienen secuencias interesantes. En mi experimento resultaba imprescindible demostrar que al menos algunos productos de la clonación eran de origen humano, y que no procedían de bacterias o de hongos que pudieran haber vivido en las momias.

Por razones que más tarde comprendimos, obtuve bastantes menos clones con ADN humano de lo que yo esperaba. La escasez de clones impedía aislar los genes de mayor interés, los que cifran proteínas específicas, ya que de esos genes suele haber sólo un par de copias por célula. Por tanto, para demostrar que había conseguido replicar ADN humano prehistórico, tuve que aislar una de las repeticiones Alu, una secuencia de las que existe casi un millón de copias en el genoma humano. De tejidos de momia, cuya edad vendría a ser de 2310 a 2550 años, aislamos un clon bacteriano que contenía dos de esas repeticiones Alu. Demostrábase así que el ADN puede sobrevivir durante mucho tiempo, después de la muerte de un individuo.

En 1984, meses antes de que tuviese mis resultados listos para la imprenta, Russell Higuchi y Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, publicaron un trabajo donde demostraban también que el ADN podía sobrevivir tras la muerte de un organismo. Ellos estudiaron el cuagga, de la familia de los équidos, que vivió en Africa del Sur hasta que se extinguió a finales del siglo pasado. A partir de muestras de piel de un cuagga de 140 años de antigüedad, cedidas por un museo alemán, crearon clones bacterianos que portaban secuencias de ADN mitocondrial, presente en múltiples copias fuera del núcleo celular. Comparando esos clones con secuencias de cebras actuales, Higuchi y Wilson pusieron de manifiesto el estrecho parentesco entre el cuagga y la cebra y su mucho más lejana relación con otros équidos. Estas fueron las primeras secuencias determinadas a partir de especies ya extinguidas.

No obstante esos primeros éxitos, vimos claro muy pronto las grandes limitaciones del estudio del ADN prehistórico. La escasez de clones convertía en tarea extremadamente difícil la repetición de los experimentos; muchos de ellos, además, ni siquiera podían acometerse por primera vez. Se descubrió la causa del escaso rendimiento de la clonación al abordar el análisis bioquímico del ADN prehistórico. La longitud media de las moléculas (unos 100 pares de bases) era siempre la misma, con independencia de que el material proviniese de un oso de más de 13.000 años, encontrado en el sur de Chile,

Hitos del ADN prehistórico

De estos organismos, ya extinguidos, se han obtenido secuencias genéticas significativas.





INSECTOS EN AMBAR — 40 MILLONES DE AÑOS
HOJAS FOSILES — 17 MILLONES
MAMUT — 40.000
SMILODON — 13.000

3. CAPSULA DE AMBAR con un escorpión prehistórico. Esa resina fósil constituye un entorno ideal para conservar el ADN, pues protege a sus "víctimas" de los efectos del aire y el agua.



o de una muestra seca de cerdo, de sólo 4 años de edad. La fragmentación ocurre, en su mayor parte, inmediatamente después de la muerte, antes de que el tejido llegue a secarse. Otros tipos de daño debíanse a los radicales de oxígeno, que reaccionan con las bases, o con el esqueleto de azúcar del ADN. Estas reacciones causan modificaciones y pérdidas de bases, provocan roturas de cadenas e instan enlaces anómalos entre distintas moléculas de ADN. Son cambios que degradan al ADN y destruyen su información genética.

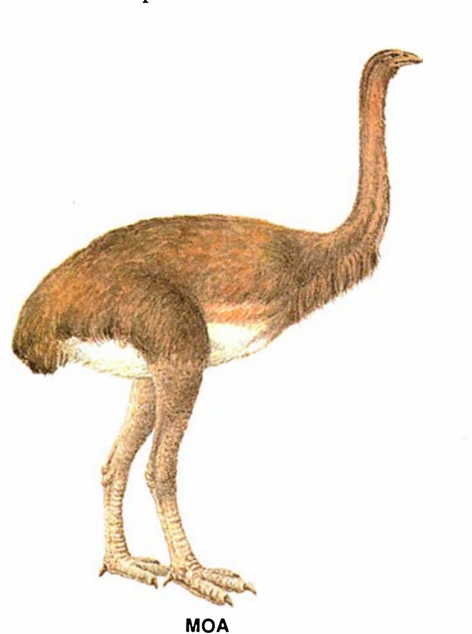
Cuando se introduce ADN prehistórico así alterado en bacterias, éstas, aunque se esfuerzan en copiarlo, no suelen lograrlo. Y si lo consiguen, lo normal es que introduzcan errores. Por ejemplo, en dos posiciones de las secuencias de los cuagga se observaron bases distintas de las que se encuentran en la misma posición en los genomas de otros vertebrados. Parecía verosímil que los clones aislados portasen errores en esas posiciones, pero la propia dificultad de obtener clones de la piel del cuagga impedía retroceder y repetir los experimentos. Por ese motivo, no pude yo aislar de nuevo las mismas repeticiones Alu de las momias para verificar su secuencia. Los biólogos moleculares que entienden del curso temporal de la evolución se hallaban ante una situación desmoralizadora. Si no podían verificar sus resultados, repitiendo el experimento, el estudio del ADN prehistórico nunca alcanzaría el estatuto de ciencia respetable.

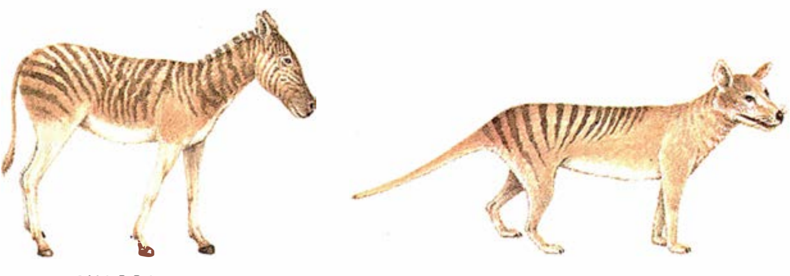
En 1985 se produjo un cambio espectacular. Kary B. Mullis ideó una técnica de clonación, en el tubo de ensayo, de extraordinario poder y sensibilidad (*véase* "Reacción en cadena de la polimerasa", por Kary B. Mullis, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1990). Esta técnica, la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), permite multiplicar *in vitro* una pieza concreta de ADN. La pieza que se itera está definida por dos fragmentos cortos de ADN, o cebadores, que se sintetizan químicamente para que sean complementarios con las secuencias de bases que flanquean el segmento a estudiar. Los cebadores inician en el tubo de ensayo una amplificación que se continúa en ciclos sucesivos. En cada ciclo se duplica el número de copias de la secuencia deseada.

Cada ciclo comienza con la separación de las dos cadenas del ADN molde, gracias a la cual los dos cebadores se sitúan en sus respectivas secuencias diana, una en cada cadena. Una enzima agrega entonces bases en los extremos de los cebadores, alargando las dobles hélices que el cebador había iniciado. Como cada cadena produce una nueva hélice doble, se duplica en cada ciclo la secuencia de ADN deseada.

Enseguida nos dimos cuenta de que la RCP revolucionaría los estudios sobre ADN prehistórico, merced a su extraordinaria sensibilidad. Es posible literalmente generar miles de millones de copias, a partir de una molécula de ADN. Una o muy pocas moléculas intactas que sobrevivan en un tejido prehistórico pueden iterarse con la RCP. Las moléculas dañadas, que pueden ser miles de veces más abundantes que las intactas, no distorsionan el experimento. Con la esperanza de explotar ese filón, me integré en el grupo de Wilson, en Berkeley, pionero en la utilización de la RCP.

Nuestros esfuerzos no tardaron en verse recompensados. Diseñamos cebadores para los segmentos de ADN de los cuagga que Higuchi había clonado en bacterias años atrás; multiplicamos el ADN procedente de los extractos de piel que él había empleado. Nuestro experimento reveló





MOA 4300 — CUAGGA 140 — TILACINO 80 — PRESENTE

CUAGGA	AGGAGGATTCGTTCACTGATTCCCTCTATTCTCAGGATACACACTCAACCAAACCTGAGCAAAAATTCACTTTACAATTAT
CEBRA MONTESA	G........T..........................G.............................C..............
VACA	...G.....T.....T........A...........T..T..T......G.T..A.....C.....C.....CG.......
HUMANOS	......C...A..........T..C...........C.....C..AG.........AC..C.....C..T..C..T..C..

4. ARBOL EVOLUTIVO del cuagga, deducido a partir de las diferencias observadas entre los ADN del équido extinguido y tres especies modernas. El cuagga comparte muchas más secuencias con la cebra que con los otros. El árbol evolutivo (*derecha*) reconstruye los cambios genéticos, como los dos que se supone ocurrieron en el antepasado común del cuagga y la cebra (*amarillo*). El cuagga difiere de

que las posiciones donde las secuencias de cuagga clonadas diferían de las de otros vertebrados, contenían la secuencia esperada para vertebrados. Por tanto, los clones bacterianos portaban errores en esas posiciones, inducidos a buen seguro por la presencia de daños en el ADN prehistórico, que las bacterias habían reparado de manera desacertada. Pero la RCP recuperaba la secuencia correcta.

De entonces acá comprobamos que la RCP nos tornaba a la secuencia prehistórica correcta, porque sus errores, aunque frecuentes, no suelen ser importantes. Alcanza, además, una notable precisión debido a que dicha técnica comienza amplificando docenas o cientos de fragmentos de ADN prehistórico. Cuando se analiza el producto final total de una amplificación de ésas, cualquier error en una posición de la secuencia de uno de los moldes iniciales lo suprimirán los otros moldes que no portan errores en dicha posición. Por contra, la clonación mediada por bacterias, que empieza con una sola molécula, se muestra más proclive a cometer errores de bulto.

Más tarde se puso de manifiesto que la RCP reconstruía también ADN intacto a partir de moléculas prehistóricas parcialmente degradadas. En esos casos, los dos cebadores se sitúan sobre moléculas parciales. Se extienden hasta un sitio dañado o hasta un extremo de la molécula molde. En el ciclo siguiente, las moléculas resultantes se separan en cadenas sencillas; estos nuevos cebadores, más largos que los originales, pueden así unirse a otras moléculas molde que no estén dañadas en el sitio donde lo estaban las moléculas molde anteriores.

Este proceso de saltos de molde en molde permite amasar información procedente de muchas piezas parcialmente degradadas. En condiciones favorables, la RCP puede iterar secuencias que son mayores que cualquiera de los fragmentos individuales presentes en la muestra original. Pretendemos ahora sacar partido de esta propiedad de la RCP para desarrollar procedimientos con los que reconstruir ADN en un estado de conservación peor que el que todavía se puede analizar. Se llevan a cabo también estudios encaminados a reparar los daños del ADN prehistórico antes de someterlo a la acción iterativa de la RCP.

Con todo, puede aducirse que la ventaja principal de la RCP reside en su sencillez técnica, que permite amplificar la misma secuencia a partir de diferentes extractos de cuagga en sólo días. Podemos así reproducir y verificar resultados obtenidos en otros laboratorios: la arqueología molecular puede reclamar por primera vez el derecho a ser considerada una rama científica respetable.

¿Podíamos aplicar la técnica a materiales procedentes de excavaciones arqueológicas con una antigüedad de miles de años? Para averiguarlo, probamos la nueva técnica con un cerebro humano que, sorprendentemente, había sobrevivido intacto durante 7000 años en Little Salt Spring, un pozo de Florida. El equipo de William W. Hauswiston, de la Universidad de Florida en Gainesville, había ya demostrado con otras técnicas que el ADN de un cerebro encontrado en un sitio similar se hallaba en un estado de conservación excelente, por una doble razón presumible: el agua tenía un *p*H neutro y contenía muy poco oxígeno.

Extrajimos fragmentos de ADN mitocondrial, cuya rápida tasa de evolución lo hace muy útil para estudios de relaciones entre poblaciones, y nos dispusimos a multiplicarlos. Fracasamos las primeras veces porque los extractos contenían factores desconocidos que inhibían las enzimas utilizadas en la RCP para replicar ADN. El problema nos incomodó durante bastantes meses, hasta que encontramos que la albúmina, una proteína de la sangre, parecía contrarrestar la inhibición, uniéndose a las impurezas que obstaculizan la acción de la polimerasa. El lamentable estado que presentaba el ADN antiguo sólo permitía iterar segmentos breves, lo que no fue óbice para que esos fragmentos nos revelaran un tipo mitocondrial del que carecen los indígenas norteamericanos de nuestros días.

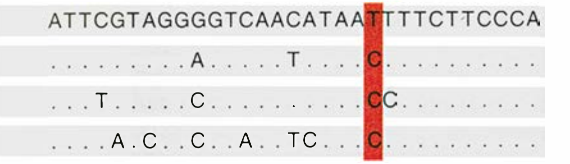
No podíamos tener la certeza de que esa variante genética se hubiese extinguido en América, porque no sabíamos mucho sobre las variaciones de secuencias mitocondriales en los indígenas norteamericanos. Para resolver la aporía hay ahora varios grupos dedicados al estudio de ese fenómeno, no sólo entre los indígenas norteamericanos, sino también entre otras poblaciones del Viejo y Nuevo Mundo.

Varios son los objetivos que se persiguen en esa línea de investigación. Las comparaciones de secuencias de ADN de poblaciones diferentes no sólo ayudan a detectar variantes comunes, sino también a estimar el grado de parentesco entre las secuencias. Esta información sirve luego para calibrar el grado de parentesco entre poblaciones, y el tiempo transcurrido desde que divergieron de un antepasado común. Se pueden encontrar también indicios de antiguas expansiones y contracciones demográficas, como las que ocurren tras la epidemias, hambrunas, guerras o emigraciones.

Los estudios de genética sugieren un origen asiático de los actuales indígenas norteamericanos. Apunta también que la colonización del Nuevo Mundo se debió a un grupo muy pequeño de asiáticos, tal vez en una sola oleada de inmigración, o en muy pocas. Nos es dado ya comprobar esas teorías, analizando el ADN de poblaciones antiguas del Nuevo Mundo. Esta posibilidad, del máximo interés por sí misma, nos faculta, además, para determinar si una población reemplazó a otra o simplemente la original adoptó un hábito cultural distinto.

Desgraciadamente, el estudio de restos humanos tropieza con dificultades técnicas, hasta cierto punto inherentes a la propia RCP: su exquisita sensibilidad constituye un arma de doble filo. Cualquier trozo de ADN moderno que caiga en el experimento será amplificado, si lleva secuencias que puedan ser reconocidas por los cebadores. Y debemos dilucidar si las similitudes entre nosotros y nuestros presuntos ancestros son reales o sólo el resultado de una técnica de laboratorio poco segura.

El ADN contaminante puede pro-

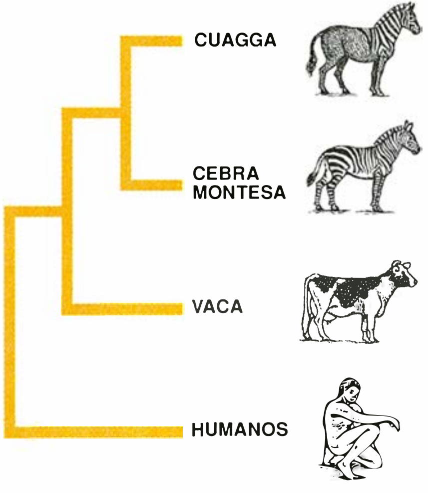


de todos los demás vertebrados en una posición (*rojo*), un error introducido durante la clonación y corregido por la RCP.

ceder de fuentes dispares: células de la piel de los propios arqueólogos o de los cuidadores de los museos que manipularon las muestras, de partículas de polvo o de cantidades mínimas de ADN de un experimento anterior realizado en la misma habitación. Este problema ha obligado a establecer procedimientos engorrosos. Todos los reactivos deben tratarse con el mayor cuidado. Las extracciones y amplificaciones han de realizarse en una habitación distinta del sitio habitual de trabajo. Los sistemas de ventilación no deben poner en contacto un laboratorio de RCP con otro que utilice material similar. Pese a todas esas precauciones, la contaminación sigue siendo un problema serio, especialmente cuando uno trata de multiplicar ADN de restos humanos antiguos, en los cuales no es fácil eliminar la contaminación procedente de restos humanos modernos.

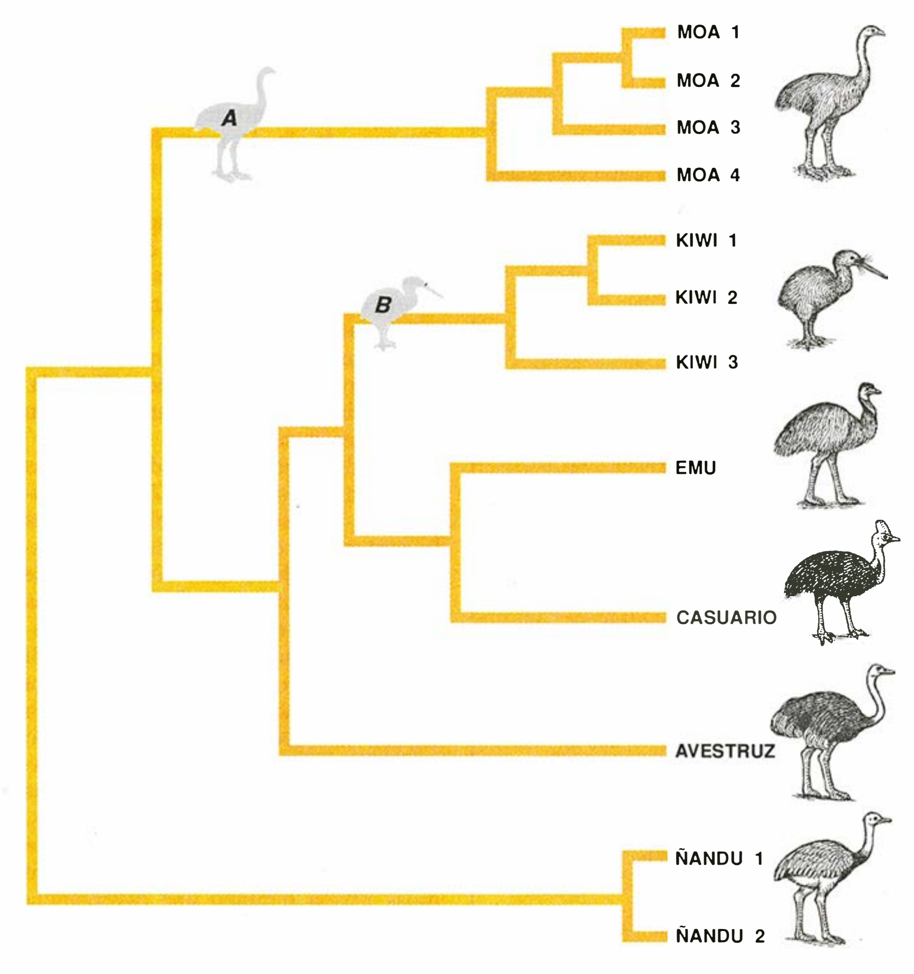
Por esa razón, el primer estudio poblacional de ADN prehistórico no se realizó con humanos, sino con una especie de remoto parentesco, la rata canguro. Junto con mis colegas Kelley Thomas y Francis Villablanca, estudié una colección de 48 pieles procedentes de museos, recogidas a lo largo de la primera mitad de este siglo en tres poblaciones del desierto de Mojave; todas contenían ADN mitocondrial en un estado de conservación aceptable, que rendía fragmentos de unos 200 pares de bases.

Tras determinar las secuencias presentes en esas pieles, consultamos viejas guías de campo para recoger muestras de ratas canguro actuales en las mismas localidades. Descubrimos que las ratas contemporáneas portan secuencias idénticas, o muy similares, a las de las ratas que vivieron hace unos 60-80 años en esos puntos, y que las poblaciones contienen tantas secuencias distintas ahora como entonces. De ello se infiere que las ratas canguro contemporáneas son descendientes directos de las poblaciones de antaño, y no de migraciones u otro tipo de distorsiones ocurridas en el curso de ese intervalo temporal. El trabajo demostró el valor de las colecciones museísticas para seguir la genética de una población a lo largo de los años.

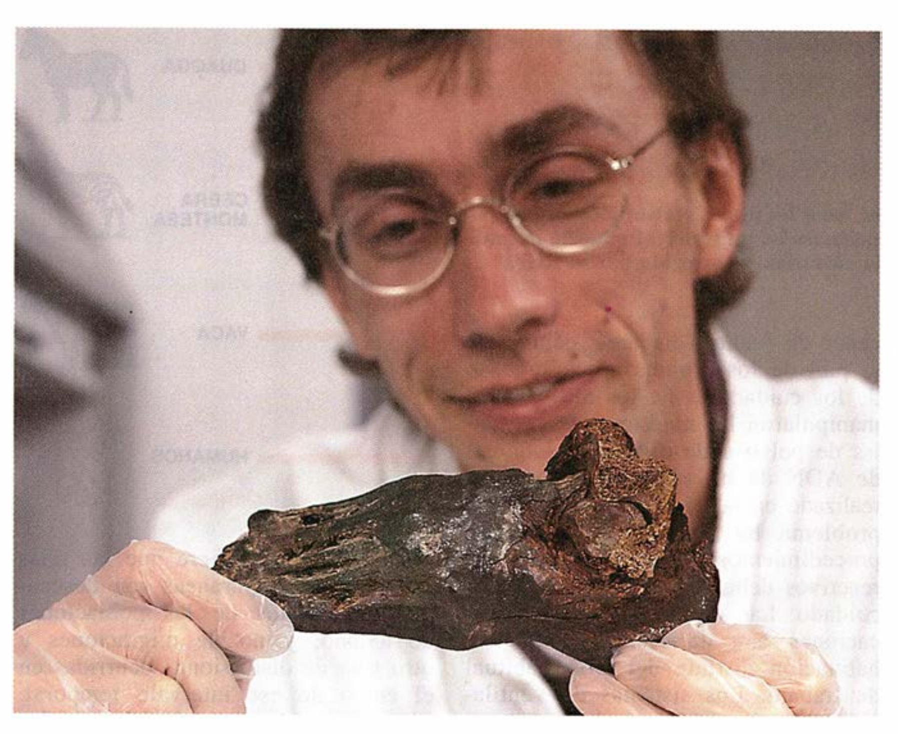


Se trata de una línea de trabajo que reviste particular interés en unos momentos en que hay tantas especies en peligro de extinción. Es sabido que, a medida que una población merma, disminuye también su diversidad genética, haciéndola más sensible a las infecciones y otras situaciones de estrés, como en el caso del guepardo (*véase* "El guepardo, en peligro de extinción genética", por Stephen J. O'Brien, David E. Wildt y Mitchell Bush, en INVESTIGACIÓN y CIENCIA, julio de 1986). Los estudios de ADN prehistórico pueden ayudar a entender mejor los cambios de acervo genético producidos a lo largo del tiempo; podría comprobarse incluso si, por norma, la caída de la variabilidad genética constituye un paso previo a la extinción.

Al principio, la búsqueda del ADN prehistórico se hacía sólo en tejidos blandos, una fracción exigua de los restos desenterrados en las excavaciones arqueológicas. En 1989, Erika Hagelberg y Bryan Sykes, de la Universidad de Oxford, consiguieron extraer ADN de huesos antiguos. Ese ácido nucleico procedía, presumiblemente, de los osteoblastos y osteoclastos, células que residen en el hueso compacto y continuamente lo remodelan a lo largo de la vida. Quizá porque el ADN se adhiere a los minerales que componen el hueso, los restos de esqueletos podrían devenir unos depósitos excelentes de ADN.



5. AVES CORREDORAS de Nueva Zelanda, como el kiwi y la extinta moa, no guardan una relación directa de parentesco. Probablemente, el antepasado de la moa llegó primero (*A*), cuando la isla se separó de Gondwana, hace unos 80 millones de años. El antepasado del kiwi parece que arribó más tarde (*B*), quizá volando.



6. AUTENTICOS TESOROS GENETICOS son las momias de América, Europa y Egipto. El autor sostiene el pie de una momia egipcia, similar a la que inspiró su primera incursión en el estudio del ADN prehistórico.

Los huesos de las moas, un grupo ya extinguido de aves corredoras de Nueva Zelanda, nos sirven de ejemplo. Algunas especies de moas llegaron a alcanzar hasta 3,5 metros de altura y 200 kilos de peso; vivieron tranquilamente hasta que llegó el hombre a las islas hace unos 1000 años y las persiguió hasta no dejar ni una. Alan Cooper, de la Universidad Victoria en Wellington, analizó huesos y tejidos blandos momificados encontrados en cuevas y pantanos. Amplificó ADN mitocondrial de cuatro de los seis géneros que existían. Sus secuencias revelaban un grado de parentesco alto entre todos ellos, pero no con los kiwis, un grupo de aves no voladoras que todavía pervive en Nueva Zelanda. Los kiwis están más emparentados con los emúes y casuarios de Australia.

Este descubrimiento indica que los kiwis arribaron a Nueva Zelanda después de las moas, probablemente tras la separación de la isla del continente australiano, hace unos 80 millones de años. ¿Carecían los kiwis de alas aptas para levantar el vuelo, como sus primos australianos, cuando llegaron? Si así era, tuvieron que entrar en Nueva Zelanda nadando, quizá siguiendo una cadena de islas, ya desaparecidas; o pudieron hacerlo volando, y atrofiaron después las alas, ya que en esas tierras no había animales carnívoros.

La comparación entre secuencias de ADN de los diversos géneros de moas revela también una divergencia muy reciente. Cooper explica esa temporización fundándose en la historia geológica de Nueva Zelanda. Gran parte de la isla se sumergió bajo las olas hace 30 millones de años, lo que pudo provocar la extinción de la mayoría de las moas ancestrales. La posterior aparición de cordilleras restableció la superficie de la isla y favoreció el desarrollo de fenómenos de especiación entre los supervivientes, que rápidamente ocuparon los nuevos nichos.

¿Hasta dónde podemos retrotraernos en la recuperación del ADN? ¿Hasta los progenitores del hombre moderno, hace unos 200.000 años? ¿Hasta los fundadores de la línea de los homínidos, hace tres millones de años? ¿Hasta los mismos dinosaurios? Conviene tener presentes ciertos límites físicos. En unos 50.000 años, el agua, por sí sola, puede degradar bases del ADN, con la consiguiente fragmentación de la molécula hasta el extremo de que resulte imposible recuperar información de las porciones resultantes. El oxígeno también contribuye a la destrucción del ADN. Incluso en condiciones ideales —ausencia de agua, ambiente anóxico y baja temperatura— la radiación del suelo termina borrando toda la información genética.

Pese a todo ello, ciertos resultados recientes animan a pensar que se puede ir más allá de lo que muchos creían posible. En 1990, Edward M. Golenberg y Michael T. Clegg, de la

Universidad de California en Riverside, publicaron una secuencia de ADN obtenida de una hoja de magnolia depositada en arcilla del fondo de un lago al norte de Idaho, hace 17 millones de años. Iteraron un fragmento de 800 pares de bases. Pamela S. Soltis y Douglas E. Soltis, de la Universidad estatal de Washington, repitieron la hazaña con muestras de otra especie vegetal encontrada en el mismo yacimiento. Extractos de otras muchas hojas del mismo sitio, sin embargo, no rindieron resultado positivo alguno. La arcilla estaba húmeda, por lo que cabe preguntarse cómo pudo el ADN sobrevivir ante el acoso agresivo del agua durante tanto tiempo.

Quizá sean más prometedores los resultados de George O. Poinar, Jr., de Berkeley, y Rob DeSalle, del Museo de Historia Natural de América. Con sus respectivos equipos han estudiado los insectos atrapados en ámbar, un entorno seco que puede quedar también protegido del oxígeno si esta resina se encuentra en condiciones adecuadas. Han extraído ADN de un insecto que quedó atrapado en ámbar hace unos 40 millones de años. Según han demostrado DeSalle y sus colaboradores, las secuencias de esos insectos, unas termitas, son compatibles con las de las termitas modernas.

Sin la menor duda, los años venideros serán testigos de una frenética actividad en ese campo. Resultará determinante comprobar si otros laboratorios pueden confirmar los resultados publicados con secuencias de ADN muy antiguas; en el caso de que se logre establecer, de forma reproducible, secuencias de ADN con millones de años de antigüedad, una de las aplicaciones más interesantes será la de medir directamente la tasa de evolución molecular. Pero la cuestión no se halla exenta de problemas. Así, costará discernir si una muestra antigua corresponde a un ancestro de una especie actual, o si las dos secuencias, antigua y moderna, comparten un antepasado común mucho más antiguo todavía. Los biólogos moleculares expertos en evolución tendrán campo abonado para una fructífera discrepancia.

Si el ADN contiene las instrucciones para construir un organismo, y el ADN prehistórico guarda fielmente esas instrucciones, surge una pregunta obvia: ¿podremos resucitar especies ya desaparecidas? ¿Podríamos clonar gemelos idénticos de nuestros antepasados más recientes o más lejanos, devolver la vida a las moas o a los cuagga, o incluso establecer granjas de dinosaurios?

Mi opinión es que ese sueño (o pesadilla) no será nunca posible. No tenemos ni idea de cómo recomponer los cromosomas de una célula funcional a partir de los millones de fragmentos de ADN que extraemos de un animal, ni qué hacer para que se pongan en marcha los miles de genes que regulan el desarrollo. Si no podemos siquiera tomar una célula de un vertebrado adulto y utilizarla para clonar otro individuo, ¿cómo podemos imaginar la clonación de una especie extinguida, a partir de los desechos del ADN prehistórico?

La resurrección de las especies perdidas estará siempre fuera de nuestro alcance. Lo más lejos que cabe soñar en esa suerte de "reanimación" es en el aislamiento de un gen prehistórico. Ese gen, introducido en una especie actual, podría originar animales capaces de mimetizar un carácter de una especie extinguida, lo que permitiría comprobar la función que desempeñó en su tiempo. Esa clase de ensayo, sin embargo, ni conserva ni recrea en absoluto las especies o ecosistemas extinguidos. La extinción es para siempre.

Podemos esperar, sin embargo, que el estudio del ADN prehistórico nos ayude a conocer mejor la dinámica de los cambios genéticos de las poblaciones a lo largo del tiempo. Así podremos no sólo entender mejor nuestra propia historia y la de otras especies, sino idear estrategias más racionales para limitar la creciente erosión de la biodiversidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DNA SEQUENCES FROM THE QUAGGA, AN EXTINCT MEMBER OF THE HORSE FAMILY. R. Higuchi, B. Bowman, M. Freiberger, O. A. Ryder y A. C. Wilson en *Nature*, vol. 312, n.º 5991, páginas 282-284; 15 de noviembre de 1984.

ANCIENT DNA: EXTRACTION, CHARACTERIZATION, MOLECULAR CLONING AND ENZYMATIC AMPLIFICATION. Svante Pääbo en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 86, n.º 6, páginas 1939-1943; marzo de 1989.

INDEPENDENT ORIGINS OF NEW ZEALAND MOAS AND KIWIS. A. Cooper, C. Mourer-Chauviré, G. D. Chambers, A. von Haeseler, A. C. Wilson y S. Pääbo en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 89, n.º 18, páginas 8741-8744; 15 de septiembre de 1992.

DNA SEQUENCES FROM A FOSSIL TERMITE IN OLIGO-MIOCENE AMBER AND THEIR PHYLOGENETIC IMPLICATIONS. R. DeSalle, J. Gatesy, W. Wheeler y D. Grimaldi en *Science*, vol. 257, páginas 1933-1936; 25 de septiembre de 1992.

Heinrich Hertz

Sin pretenderlo, descubrió en 1887 las ondas hercianas. Ellas han revolucionado las comunicaciones planetarias y el objeto de la física, que pasó de los cuerpos a los campos

Manuel García Doncel

Entre los diversos monumentos que inmortalizan la personalidad de Hertz, muerto hace ahora cien años, sobresale la torre de televisión dedicada "A Heinrich Hertz, hijo de la ciudad de Hamburgo". Allí nació el 22 de febrero de 1857, primogénito de una familia acomodada. Su padre, Gustav Ferdinand Hertz, fue senador y presidente de la audiencia; descendía de banqueros y joyeros judíos, procedentes de Hildesheim, que se habían convertido a la fe luterana. Su madre, Anna Elisabeth Pfefferkorn, era hija de un médico militar de Frankfurt.

A los tres años, cuenta la madre en sus *Recuerdos*, "Heins" le sorprendió cierto día con su prodigiosa memoria, recitándole el centenar de fábulas que ella le había ido leyendo. Desde los seis hasta la preparación para la confirmación luterana a los 15, frecuentó una escuela privada, dirigida por Wichard Lange. Los dos años siguientes recibió clases particulares en casa, preparándose para entrar en el Instituto humanístico y superar un año más tarde el examen de bachillerato. Demostraba dotes sobresalientes para todo (menos para la música y el canto). Las clases particulares en casa incluían, después de cenar, las de un maestro tornero. Con el torno profesional que sus padres le regalaron construyó sus primeros aparatos de física, entre ellos un espectroscopio.

En el Instituto será el primero en griego. Incluso en árabe hizo sus progresos. Pero sus planes eran claros: "Si logro, escribe, superar el examen de bachillerato, pienso ir a Frankfurt del Main, y trabajar allí un año con un maestro de obras prusiano, como es obligatorio para poder hacer más tarde el examen de estado en la especialidad de ingeniería; sólo en el caso de que se viera que no soy apto para ese oficio, o que mi afición por las ciencias creciera aún más, me dedicaría a las ciencias puras. Que Dios me ayude a abrazar aquello para lo que sea más capaz."

Superado su examen de bachillerato, se traslada por un año a Frankfurt. Allí trabajó como delineante, primero en la Inspección General de Arquitectura y más tarde a las órdenes de ingenieros de caminos, que le encargaron, por ejemplo, elaborar los planos del gran puente superior sobre el Main. El trabajo le deja muchas horas libres, que aprovecha para proseguir sus lecturas de los clásicos, sin dejar el árabe. Estudia matemáticas, asiste a clases de química y se pone en contacto con la Sociedad de Física. Lee libros de física, especialmente el *Tratado de Física Experimental* de Adolf Wüllner. "De nuevo he cobrado gran placer por las ciencias, con la lectura del Wüllner. Pero no me persuadiré que deba renunciar a lo que me había propuesto como meta más hermosa" (ser ingeniero).

El semestre siguiente, se trasladó al Politécnico de Dresde. Divide las clases de allí en interesantes y aburridas; entre las primeras menciona la historia de la filosofía y las matemáticas, especialmente las que le da Leo Königsberger sobre cálculo diferencial e integral y mecánica analítica.

El curso siguiente, 1876-77, hace el servicio militar en Berlín. Desde allí escribe a sus padres: "He cumplido veinte años, y por así decir, tengo a mis espaldas un tercio de mi vida. Y me siento tan débil e insignificante y tan incapaz de hacer algo... Cada día me muestra lo inútil que soy en este mundo. Sé algo de griego y algo de matemáticas y algo de esto y aquello... Pero que, cuando se grite... '¿Quién es capaz de sacarnos de este o aquel apuro?' que yo pudiera dar entonces un paso al frente, es algo que aún no me ha pasado nunca. Así que tengo puesta en el futuro una esperanza mayor que la satisfacción del pasado."

En octubre de 1877 se traslada a Munich, dispuesto a estudiar ingeniería. A fines de mes, tiene ya decididas las asignaturas que seguirá en la Escuela Técnica Superior. No parece demasiado convencido, sin embargo: "He estado también dando vueltas a lo que he dicho con frecuencia en el pasado: que preferiría ser un científico eminente a ser un ingeniero eminente, pero preferiría ser un ingeniero mediocre a ser un científico mediocre." Sin excluir la otra alternativa, le confiesa a su padre: "Si me dices que debo estudiar ciencias, lo recibiré como un gran regalo tuyo."

Ante la respuesta paterna afirmativa, se matriculó inmediatamente en la Universidad. Allí encontró a Philipp von Jolly, quien le trazó un plan a su medida: estudiar matemáticas y mecánica en sus fuentes históricas, como la *Mécanique Analytique* de Lagrange, la *Mécanique Céleste* de Laplace y la historia de las matemáticas de Jean Étienne de Montucla. Seguirá algunas clases: laboratorio de física, laboratorio de química y matemáticas superiores (funciones elípticas y de variable compleja). Estudia de nuevo el *Tratado de Física Experimental* de Wüllner. Lee también las *Acta Eruditorum,* la vieja publicación mensual científico-literaria fundada en Leipzig en 1682, y al ver los descubrimientos físico-matemáticos realizados a finales del siglo XVII, comenta: "¡Lástima no haber vivido cuando se podía descubrir algo realmente nuevo!"

Acabados esos dos semestres, Jolly le aconsejó continuar en otra universidad: Leipzig, Berlín o Bonn. Optó por Berlín. Pasó antes unas vacaciones en Hamburgo, en las que con su torno

MANUEL GARCIA DONCEL dirige el Seminario de Historia de las Ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona, de la que es catedrático de física teórica. Autor de varios trabajos sobre Hertz, es experto reconocido en historia de la teoría de campos.

construyó una brújula tangente enormemente sensible. Llega a Berlín en octubre de 1878 y se matricula de su tercer semestre de física. Asiste a una clase de Gustav R. Kirchhoff, famoso ya por su ley de radiación. Sólo sigue otra clase teórica de dinámica analítica.

Se entusiasma muy pronto con el laboratorio de física, el mejor de su época, montado en 1870 por Hermann von Helmholtz. Lleno de admiración describe a sus padres su propio laboratorio, dotado de herramientas, soplado de vidrio, gas, agua corriente y electricidad procedente de baterías instaladas en otra habitación, para que no moleste el vapor de los ácidos; como detalle, los galvanómetros de suspensión se apoyaban en repisas de hierro empotradas en la pared y, para evitar las vibraciones que sobre ellos pudieran ocasionar los coches de caballos de la Dorotheenstrasse, se habían levantado pilastras de piedra maciza desde los fundamentos del edificio. Pero echa de menos su brújula.



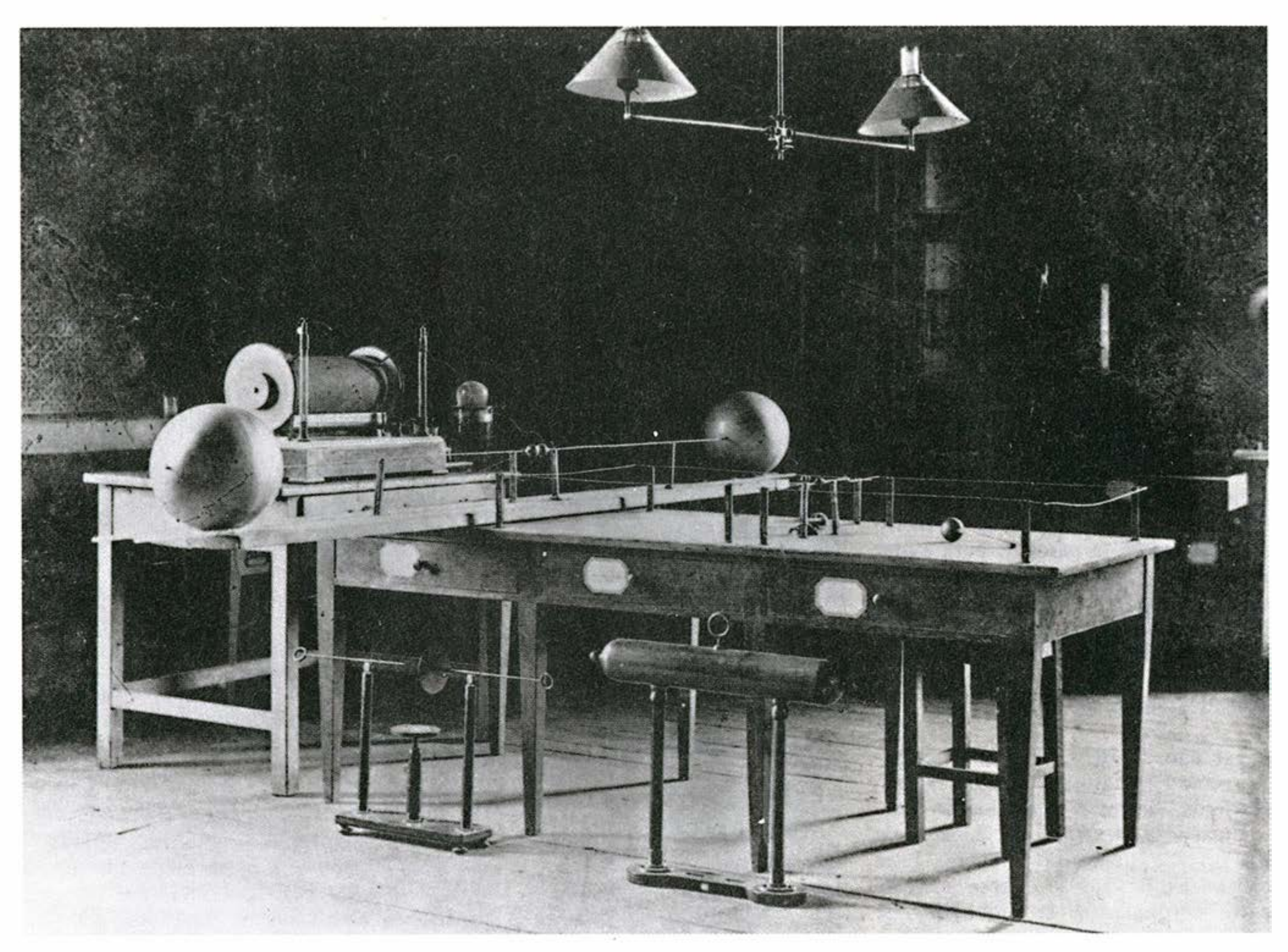
1. HEINRICH HERTZ, nacido en Hamburgo el 22 de febrero de 1857 y muerto en Bonn el 1 de enero de 1894. Su período más creativo, en que descubre las "ondas hercianas", es el de su profesorado en la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe en 1885-89. La foto corresponde al año 1891 cuando, ya en Bonn, concluye la redacción de sus *Investigaciones sobre la propagación de la fuerza eléctrica* y comienza la de sus *Principios de la mecánica*.

Ese año de 1870, Helmholtz publicó su estudio sobre la "selva sin senderos" de las diversas teorías electrodinámicas, desarrolladas a partir de las investigaciones de Ampère. Tales teorías explicaban la fuerza ejercida entre corrientes y la inducción de nuevas corrientes mediante un potencial electrodinámico instantáneo, del mismo modo que las fuerzas de Coulomb entre cargas y la inducción de nuevas cargas se habían explicado mediante un potencial electrostático. El estudio de Helmholtz resolvía el enigma de que pudieran concordar con la experiencia teorías basadas en expresiones matemáticas muy diferentes del potencial electrodinámico, demostrando que todas esas expresiones matemáticas dan el mismo resultado al ser integradas para obtener el potencial de circuitos eléctricos cerrados, los únicos utilizados hasta entonces en los experimentos.

Helmholtz presentaba también la reciente teoría de Maxwell, de la que sólo se habían publicado entonces tres artículos. Pero, por más que la teoría de Maxwell, basada en las experiencias e intuiciones de Faraday, constituya una típica teoría de campos, con acciones transmitidas por contigüidad y en el tiempo, Helmholtz la reinterpretaba como una teoría electrodinámica más, asignándole una nueva expresión del potencial que daba cuenta de la formación de ondas de polarización en el seno de los dieléctricos del tipo de las ondas de luz obtenidas por Maxwell. Esta reinterpretación de Helmholtz divulgó en el continente, aunque deformada, la concepción británica de Faraday y Maxwell, y sólo así comenzó a conocerla Hertz.

Por otra parte, el estudio de Helmholtz renovaba las antiguas disputas con Wilhelm Weber, quien en su escuela de Gotinga había desarrollado desde 1847 la más bella de las teorías electrodinámicas. Con estas nuevas disputas se relaciona el premio ofrecido por la universidad al alumno que mostrase que la electricidad "se mueve con masa inerte en los cuerpos (conductores)". (Hoy diríamos que el cociente m/e entre la masa y la carga del electrón no es nulo.) Esa inercia, que modificaba las leyes de la inducción de corrientes, puede estudiarse mediante medidas de precisión de la intensidad de las corrientes autoinducidas en un circuito, en el momento de abrirlo o cerrarlo. Helmholtz le propuso a Hertz atacar el problema, le proporcionó bibliografía y le ofreció el laboratorio.

En noviembre de 1878 Hertz está sumergido en el problema y el 4 de mayo del año siguiente pudo entregar, bien lacrado, su trabajo "Experimentos sobre la determinación de un límite superior de la energía cinética de la corriente eléctrica". El 3 de agosto obtuvo el premio. Helmholtz, tras felicitarle, le sugiere un nuevo



2. FOTOGRAFIA DEL LABORATORIO DE HERTZ, tomada por él mismo. Se distingue el primer "oscilador de Hertz", terminado por esferas metálicas huecas de 30 cm de diámetro. Entre ellas puede apreciarse el "chispero", formado por dos bolas macizas de latón de 3 cm de diámetro, separadas menos de 1 cm. Un potente carrete de Ruhmkorff alimenta el oscilador. Los circuitos rectangulares aislados sobre la mesa constituyen un complejo resonador.

trabajo que podría constituir su tesis doctoral: "Establecer experimentalmente alguna relación entre fuerzas electrodinámicas y la polarización eléctrica de los aislantes..." Durante el verano de 1879, Hertz proyecta y calcula las posibilidades de esa demostración experimental, pero no encuentra ninguna pista segura. Redacta un documento de estudio que presentará en octubre a Helmholtz, quien apenas le presta interés. Enfoca muy pronto un trabajo teórico "Sobre la inducción (de corrientes) en esferas que giran (en la proximidad de imanes)", que resolverá en pocos meses y presentará como tesis doctoral. "Pero, escribe, quedaba en pie mi ambición de encontrar más tarde... la solución al problema entonces planteado." Este será el punto de partida de sus trabajos de Karlsruhe.

A mediados de enero de 1880 recibe del Ministerio un permiso especial para poder someterse al examen de doctorado, habiendo cursado sólo cuatro semestres de física (dos en Munich y dos en Berlín). Hertz recibió el doctorado, aún no cumplidos los 23 años, con la calificación de "magna cum laude", nada común entonces, sobre todo estando Kirchhoff y Helmholtz en el tribunal. Hertz, harto de trabajo teórico, volverá al laboratorio ese mismo mes de febrero.

Acepta el ofrecimiento de Helmholtz de ser su asistente, y en calidad de tal permanecerá en Berlín dos años y medio. Contra lo previsto, hubo de sustituir al encargado de dar las cinco horas diarias de prácticas de laboratorio y supervisar el material de prácticas. Participa activamente en las sesiones de la Sociedad de Física, presidida por el electrofisiólogo Emil Du Bois-Reymond, y asiste a reuniones concurridas por Helmholtz, el electro-técnico Werner von Siemens y el matemático Karl T. Weierstrass, entre otros. Publica por entonces una serie de artículos de temas teóricos y experimentales diversos (elasticidad, hidrodinámica, termología, descargas en tubos Geissler), pero se siente como desbordado en su trabajo. "¡Cuánta paciencia es necesaria incluso en relación al propio trabajo! En un día se pueden idear más experimentos y trabajos que los que se pueden realizar en un año."

En marzo de 1883 le ofrecen en Kiel un puesto de profesor no numerario, y lo acepta. Sus obligaciones docentes son menores y con un número de alumnos menor. Añora su laboratorio berlinés y ha de enfocar su investigación a temas teóricos, de hidrodinámica y de electromagnetismo. Estudia el *Tratado de electricidad y magnetismo* de Maxwell, publicado en 1873. Este clásico presenta la nueva concepción británica del campo electromagnético. La teoría electromagnética de la luz se explica allí a partir de las "ecuaciones de Maxwell" en ausencia de cargas y corrientes, que relacionan las variaciones espaciales del campo magnético con las variaciones temporales del campo eléctrico, y viceversa. Maxwell expone esas relaciones dentro de un conjunto de ecuaciones dinámicas y en forma asimétrica:

mientras la primera de esas relaciones es formulada de una manera directa, la segunda lo es a través de un "potencial vector" (heredero del "estado electrotónico" de Faraday).

En enero de 1884, Hertz reflexiona sobre "rayos electromagnéticos" y la "teoría electromagnética de la luz"; en abril, sobre "acciones magnetodinámicas". Esas lucubraciones sobre el *Treatise* de Maxwell y los fundamentos de la electrodinámica madurarán en mayo-junio de 1884 en forma de una famosa publicación: "Sobre la relación entre las ecuaciones electrodinámicas de Maxwell y las de la electrodinámica opuesta". Por más que ese artículo se inspire claramente en obras de Helmholtz, reconstruye allí las ecuaciones de Maxwell sobre los principios de unicidad de la fuerza eléctrica y unicidad de la fuerza magnética, y las formula por primera vez en forma simétrica, sin potencial vector. El que más tarde atribuya a otros esa prioridad y nunca mencione este trabajo induce a pensar que llegará a olvidarlo.

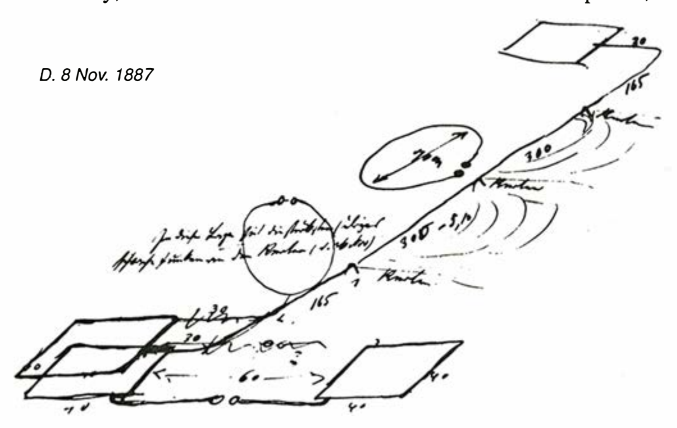
A fines de marzo de 1885 se convierte en catedrático de la Escuela Técnica Superior de Karlsruhe, donde pasará cuatro años justos, dos de los cuales constituyen su período más creativo: el año y medio precedente viene a constituir la preparación, la puesta en estación del genio. El medio año siguiente supone la difusión de su descubrimiento. El período de preparación comienza con su lección inaugural, "Sobre la economía energética de la Tierra". Concluye con su boda (el 31 de julio de 1885) con Elisabeth Doll. Sin ser especialista en electromagnetismo, Elisabeth colaborará siempre con Heinrich: irá al laboratorio, le ayudará en casa a hacer dibujos importantes y, cuando le encuentre más angustiado en el nerviosismo de sus descubrimientos, le suplirá en la tarea de escribir a sus padres, describiéndoles a su manera esos descubrimientos mágicos.

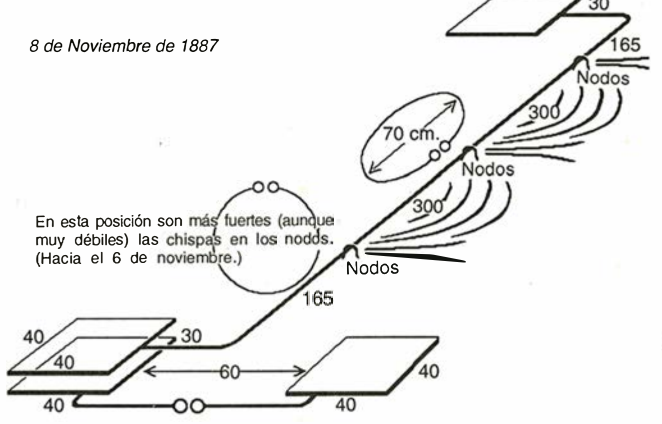
El período más fecundo se extiende de octubre de 1886 a octubre de 1888. Su primer logro fue construir lo que hoy llamamos un "oscilador de Hertz", aparato capaz de producir corrientes alternas de altísima frecuencia que recorren alternativamente en uno y otro sentido un circuito abierto. La novedad es ese récord de frecuencia: centenares de megahertz, que diríamos hoy. William Thomson había probado teóricamente en 1853 que la frecuencia de un circuito es función de sus propiedades de capacidad y autoinducción. Hertz construye un circuito rectilíneo formado por dos esferas de metal, cuya capacidad calcula, conectadas mediante una varilla metálica, cuya autoinducción calcula también. Pero su mérito consiste en intercalar en el centro de esa varilla "un chispero", es decir, una corta interrupción de la conducción eléctrica, que obliga a saltar por el aire a la corriente de alta frecuencia en forma de chispas. La formación de esa corriente de alta frecuencia depende de las propiedades, hasta entonces imprevisibles, de esa descarga en el chispero. Por supuesto esta corriente de alta frecuencia ha de ser excitada y mantenida mediante descargas de un "carrete de Ruhmkorff", que por medios electromecánicos produce una corriente alterna de frecuencia mucho menor.

Esa corriente fuertemente variable del oscilador o circuito primario produce efectos de inducción sobre un circuito secundario próximo. Las corrientes inducidas son debilísimas, pero Hertz consigue detectarlas. Intercala para ello en el secundario un "microchispero", regulable mediante un tornillo micrométrico hasta producir chispas de centésimas de milímetro, que son apenas visibles pero audibles. A este circuito secundario lo llamamos "resonador", pues Hertz comprueba que, modificando sus condiciones de capacidad y autoinducción, se logra que entre en resonancia con el primario.

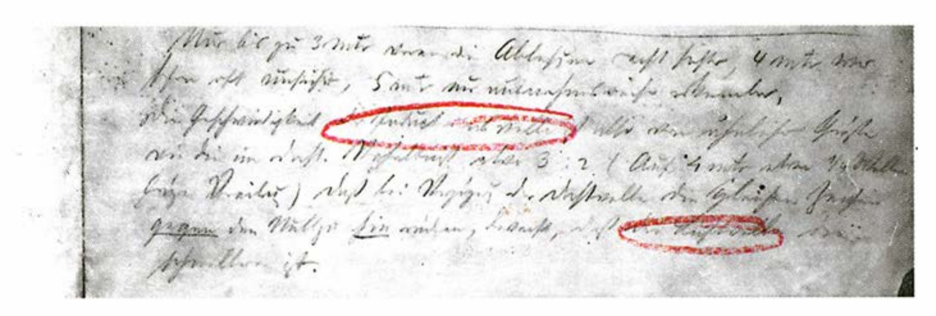
De estos aparatos conservamos una fotografía, realizada y revelada por el propio Hertz, que inmortaliza su oscilador, alimentado por el carrete de Ruhmkorff, y un complicado resonador. Nosotros vemos en ella un primitivo emisor y un primitivísimo receptor de ondas hercianas, pero Hertz veía entonces un circuito primario de alta frecuencia, capaz de inducir corrientes en el secundario. Aunque terminadas en diciembre de 1886, no publicará estas experiencias hasta marzo de 1887, en su artículo inicial: "Sobre oscilaciones eléctricas muy rápidas".

El retraso se debe a una anomalía que Hertz considera una perturbación de sus experiencias: el funcionamiento del microchispero del secundario resultaba totalmente irregular cuando éste era iluminado por las chispas del primario. Su primera impresión era haber descubierto en sus chispas de alta frecuencia un nuevo fenómeno eléctrico, distinto de las acciones electrostática y electrodinámica propias de las cargas y las corrientes. Pero pronto logrará demostrar que el fenómeno no tiene nada que ver con altas frecuencias. Lo que perturbaba el microchispero era la luz, en concreto la luz ultravioleta, producida por las chispas de alta frecuencia del primario. Estas investigaciones se recogen en su escrito "Sobre un influjo de la luz ultravioleta en la descarga eléctrica". Es el primer artículo sobre lo que veinte años más tarde





3. NOTAS DE LABORATORIO Y SU INTERPRETACION. Muestran el montaje para producir ondas estacionarias en alambres. Una de las placas terminales de su oscilador induce electrostáticamente la placa paralela de otro circuito. Las ondas, o corrientes de alta frecuencia, así producidas se reflejan en otra placa terminal, produciendo ondas estacionarias. Hertz indica tres nodos, detectados con el resonador "casi con tanta claridad como los nodos de una cuerda vibrante".



4. NOTAS DE LABORATORIO correspondientes al 27 de diciembre de 1887, en que se mencionan por primera vez lo que hoy llamamos "ondas hercianas". Una vez comprobada la velocidad finita de la acción electrodinámica procedente del oscilador, Hertz la concibe como onda y, en oposición a las ondas en alambres, la denomina "onda inductiva" (*Inductionswelle*) y "onda aérea" (*Luftwelle*).

se denominará "efecto fotoeléctrico", una de las bases experimentales de la física cuántica.

Entramos en el proceso de "conversión de Hertz a las ondas hercianas". Ella le convierte de la clásica concepción electrodinámica, que sólo ve cargas y corrientes en conductores actuando a distancia, a la nueva concepción de teoría de campos, que ve variaciones electromagnéticas por todo el espacio, aun el espacio vacío. En este proceso de conversión, que se realiza durante el otoño e invierno de 1887-88, distinguimos tres pasos. El primero consiste en convencerse de que también en cuerpos aislantes pueden producirse corrientes eléctricas de alta frecuencia, detectables por sus efectos de inducción electrodinámica (las "corrientes de desplazamiento", en terminología de Maxwell). Para Hertz era el problema propuesto en 1879 por la Academia de Berlín, que resolverá con ocho años de retraso. Sus primeros intentos, análogos a los proyectados entonces, aunque usando ahora el récord de frecuencia de su oscilador, fracasaron totalmente.

Las experiencias exitosas se realizaron entre primeros de septiembre y primeros de noviembre de 1887. Se basan en montar oscilador y resonador para constituir una "balanza electrodinámica". Por pura simetría respecto a un plano, la balanza ha de estar en equilibrio, es decir, no pueden saltar chispas en el microchispero del resonador. El equilibrio se rompe y aparecen las chispas con sólo colocar un conductor paralelo al oscilador, pues en él se inducen corrientes que producen a su vez efectos de inducción en el resonador.

Hertz demostró que el efecto de desequilibrio electrodinámico que producía un pequeño conductor lo producía también un pesado bloque de aislante; y que, colocando simétricamente conductor y aislante, el equilibrio se recuperaba. El 5 de noviembre envía a la Academia de Berlín una comunicación sobre el tema. Helmholtz le contesta el 7 de noviembre con un famoso «¡¡Bravo!!»

Esta convicción de la producción de corrientes de alta frecuencia en los dieléctricos constituye sólo un paso inicial en la conversión de Hertz. Cabía seguir pensando desde el punto de vista electrodinámico en acciones a distancia instantáneas. El único elemento a añadir a esa electrodinámica era que, frente a oscilaciones de alta frecuencia, las cargas eléctricas se comportan en los aislantes de modo análogo a como se comportan en los conductores.

El segundo paso de la conversión consiste en convencerse de que la acción inductiva electrodinámica no es instantánea, como concebía la clásica teoría electrodinámica, sino que se transmite por el espacio con velocidad finita. Los experimentos que, tras un período de confusión, dieron resultados satisfactorios se basan en las interferencias producidas en el resonador entre esa acción inductiva procedente del oscilador de Hertz y la acción inductiva de una corriente de su misma alta frecuencia transmitida por un alambre hasta la proximidad del resonador. Hertz no concibe todavía como ondas a esas acciones propagadas por el aire, sino sólo a las corrientes de alta frecuencia propagadas por el alambre.

Hertz las detecta como ondas estacionarias producidas por reflexión en el extremo del alambre y, según escribe a Helmholtz, sus nodos resultan "visibles casi con tanta claridad como los nodos de una cuerda vibrante". Las Notas de Laboratorio con fecha 8 de noviembre recogen un expresivo dibujo que visualiza estas ondas estacionarias sobre un alambre terminado por ambos extremos en sendas placas, en las que se producen y reflejan esas ondas.

Suprimiendo la placa reflectora final y prolongando el alambre hasta 60 metros por el jardín de la Escuela, obtenía en su laboratorio ondas progresivas de la misma frecuencia y velocidad. Estas ondas pueden retrasarse alargando, con inserciones de diversa longitud, el alambre por su extremo inicial. La interferencia de la acción inductora de estas ondas y la acción directa propagada por el aire puede estudiarse a diversas distancias del oscilador. A tal fin basta conocer la acción de una y otra para distintas orientaciones del resonador y su microchispero.

Si la velocidad de propagación de la acción directa fuera infinita, las interferencias reproducirían exactamente la longitud de onda del alambre; si la velocidad es superior a la de las ondas del alambre pero finita, las interferencias se repetirán a distancias algo mayores. Pues bien, las interferencias que estuvo observando Hertz durante mes y medio (del 10 de noviembre al 23 de diciembre de 1887) parecían reproducir las ondas del alambre y corresponder a una propagación de la acción directa con velocidad infinita. Esto significaba que no hay ondas electromagnéticas en el aire y producía en Hertz "sospechas sobre la teoría maxwelliana". Pero, en la tarde del 23 de diciembre, obtiene los primeros indicios de que las distancias de interferencia son algo mayores que la longitud de las ondas del alambre y, por tanto, que la velocidad de la acción directa es finita. Esos indicios se confirman el 26 de diciembre. Se atribuye el fallo anterior al comportamiento anómalo de la acción directa a muy cortas distancias, a las que, según su mentalidad de entonces, "domina la acción electrostática" del oscilador.

El tercer paso de la conversión de Hertz consiste en convencerse de que esa acción directa se transmite por el espacio en forma de ondas. Es una consecuencia del resultado anterior, con la que Hertz irá familiarizándose poco a poco. Ya el 27 de diciembre, al hacer una primera estimación de esa velocidad finita, expresa el carácter ondulatorio de esa acción directa. Acuña para ello los términos "ondas inductivas" y "ondas aéreas", que son, sin duda, los primeros empleados para designar lo que hoy llamamos "ondas hercianas". El 29 de diciembre queda sorprendido de que esas ondas sean apantalladas por placas metálicas y reflejadas en ellas. Decide observarlas fuera de la línea única en que hasta ahora las ha detectado, midiendo la dirección

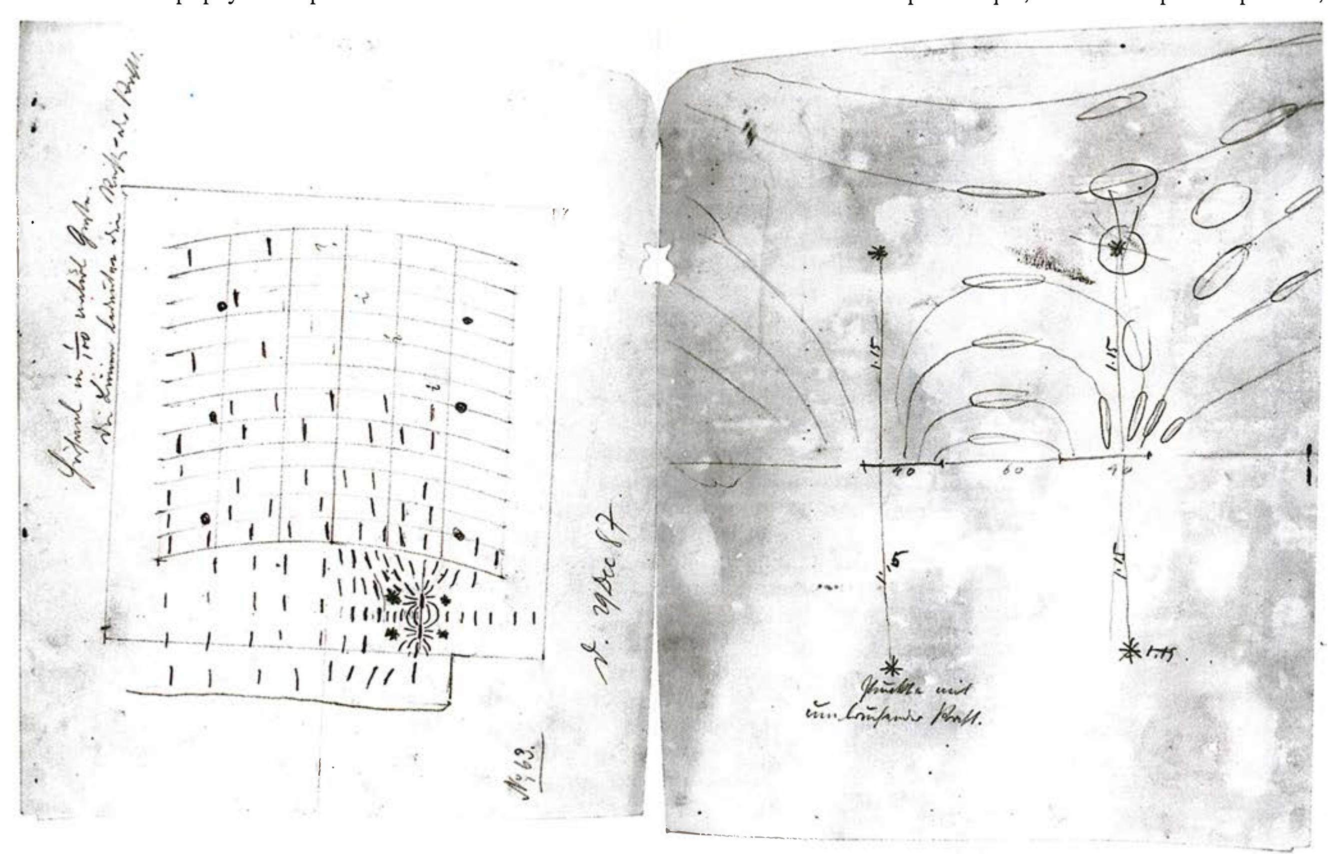
media del campo eléctrico en el plano horizontal del oscilador "a través del aula entera". Obtiene así una cierta figura ondulatoria estática de líneas que brotan de su oscilador, figura que en su imaginación llega a cobrar dinamismo. Hertz había consumado su conversión a las ondas hercianas. Pero sus pruebas indirectas no servían para convencer a los electrodinámicos habituados a la acción inductiva a distancia.

En la primavera y verano de 1888, dio una demostración experimental directa y ahondó en la teoría subyacente a la formación de esas ondas. La demostración experimental consistió en producir ondas estacionarias, como lo había hecho con las ondas en alambres. En marzo escribía a Helmholtz: "Creo que la naturaleza ondulatoria del sonido en el espacio libre no puede ponerse ante los ojos con tanta claridad como la naturaleza ondulatoria de esta propagación electrodinámica." Para su mundo electromagnético, había pasado de observar la cuerda vibrante a observar el sonido mismo. Pero la experiencia, tal como él la realizó, resulta una epopeya irrepetible. El problema estaba en que sus "ondas aéreas" tenían unos diez metros de longitud, y el mayor espacio de que disponía era su aula máxima, de unos 15 metros de larga. Habrá de esperar a las vacaciones de Pascua de 1888, para poder desmontar en ella todas las lámparas de gas con sus tubos colgantes, e instalar sobre las mesas un corredor a media altura que minimice reflexiones en suelo y techo. Las ondas estacionarias son producidas a esa altura, al interferir las ondas que salen de su oscilador con las reflejadas en una placa metálica colocada en la pared opuesta.

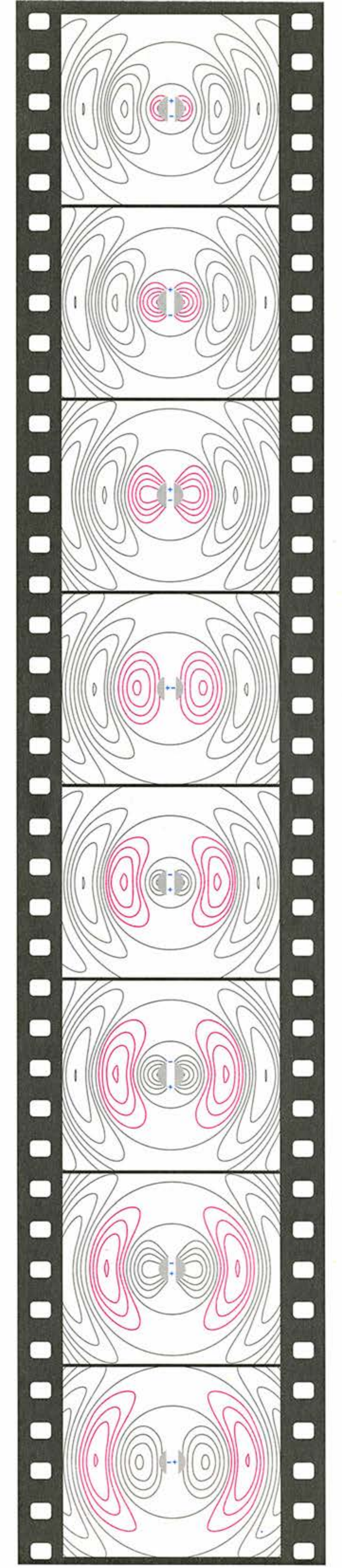
La epopeya de Heinrich Hertz consistió en estudiar, para diversas posiciones del resonador, la variación de las microchispitas de centésimas de milímetro, por supuesto con el aula a oscuras, subido a aquel corredor sobre las mesas, y procurando ladear su cuerpo para no perturbar con él las ondas... Pero quedó convencido de la presencia de esas ondas, y adivinó nodos y vientres que correspondían a una longitud de onda de 9,6 metros. Así los dibuja en su artículo "Sobre ondas electrodinámicas en el aire y su reflexión", de abril de 1888.

Esos experimentos le llevaron a aceptar la teoría maxwelliana al menos como la hipótesis más sencilla y aclarar, en su marco, la estructura de las ondas. La explicación teórica apareció en su artículo "Las fuerzas de las oscilaciones eléctricas, tratadas según la teoría maxwelliana". En este trabajo modélico, parte de las ecuaciones de Maxwell y de la teoría de John H. Poynting sobre la transmisión de la energía electromagnética por el espacio para calcular la formación de las ondas hercianas en torno a su oscilador, idealizado como un dipolo, o sea, dos cargas opuestas que oscilan simétricamente con una enorme frecuencia. El cálculo es bello, pues parte de las ecuaciones de Maxwell en forma simétrica, sin utilizar los potenciales e introduciendo en su lugar lo que hoy denominamos el "vector de Hertz".

Este cálculo teórico hace corregir a Hertz experiencias anteriores. Sobre todo le explica los enigmas relativos a la fuerza electrostática, dominante a cortas distancias del oscilador. En el nuevo cuadro maxwelliano, en que no existe más que un tipo de fuerza eléctrica, el enigma se reduce a comprobar que, durante el primer período,



5. DIBUJO AUTOGRAFO de Hertz del 29 de diciembre de 1887, en el que detecta por vez primera la dirección del campo eléctrico producido por su oscilador en todo un plano " a través del aula entera". Su experiencia sólo puede detectar la dirección media, y ésta no se encuentra definida en cuatro puntos alrededor del oscilador, marcados con asterisco. Adviértanse, en el dibujo ampliado de la derecha, los cuatro puntos marcados con asterisco, alrededor del oscilador. Bajo uno de ellos se lee: "Punto con / fuerza que gira sobre sí misma". Ese movimiento del campo eléctrico, imaginado por Heinrich Hertz para dar cuenta de lo detectado, constituye una primera intuición de las ondas hercianas.



6. INSTANTANEAS SUCESIVAS a lo largo de un período, que visualizan la formación de ondas hercianas alrededor de un dipolo (*en azul las posiciones de las cargas*). Representan las líneas de fuerza eléctrica (las de fuerza magnética son perpendiculares al dibujo). La parte en rojo visualiza la formación en el dipolo de líneas de fuerza del tipo de las electrostáticas, su ulterior estrangulamiento para formar ondas toroidales y su transformación final en ondas esféricas (menos densas en la dirección del eje del dipolo). Las líneas están dibujadas mediante la fórmula de Hertz (*véase recuadro siguente*) con un programa informático. (Gentileza de Frederic Udina, de la Universidad Pompeu Fabra.)

esas ondas, que aún no han cobrado su forma esférica, avanzan a una velocidad superior a la velocidad de la luz.

Hertz solventa el enigma, haciendo notar que la onda no surge puntualmente del centro del oscilador, "sino que proviene de las condiciones de todo el espacio a su alrededor que es en último término, según nuestra teoría, la sede auténtica de la energía". Calcula además la energía electromagnética irradiada mediante esas ondas. Todo esto refuerza su convicción en la realidad del campo electromagnético, descrito mediante las ecuaciones de Maxwell.

Pero todo eso eran razonamientos teóricos y sus experiencias anteriores resultaban irrepetibles. Debía idear una experiencia fácil de reproducir en todos los laboratorios del mundo y que hiciera indiscutible la existencia de esas ondas. Esto es lo que realiza en sus últimos meses de Karlsruhe, y describe en su artículo "Sobre rayos de fuerza eléctrica".

Su nuevo mérito consistió en fabricar un oscilador más pequeño que, superando aún el récord de altas frecuencias, producía ondas de menos de un metro de longitud. Colocando el pequeño oscilador en la línea focal de un espejo cilíndrico-parabólico (una lámina de 2 × 2 metros, convenientemente curvada) produce un "rayo de fuerza eléctrica". Las experièncias de Hertz demuestran que ese rayo tiene todas las propiedades ópticas de un "rayo de luz de longitud de onda muy grande", como un millón de veces mayor que la de la luz ordinaria. Tal luz no impresiona nuestro ojo, pero puede detectarse con un resonador, especialmente con un resonador rectilíneo colocado en el eje focal de otro espejo idéntico. Es fácil comprobar con ese rayo la propagación rectilínea, las leyes de la reflexión y de la refracción (el prisma es de masa asfáltica y pesa 600 kilos) y las propiedades de polarización (la red es de alambres de cobre, a 3 centímetros de distancia unos de otros).

Tales experiencias fueron repetidas y aclamadas por el mundo entero. Como escribía Hertz a sus padres, "es naturalmente mi último trabajo el único que salta a la vista del mundo entero", por más que a su juicio el mérito estaba en la pista trazada por los anteriores. La fama de Hertz se extiende, y le ofrecen cátedra en la universidad austriaca de Graz, la americana de Worcester y las alemanas de Giessen, Berlín y Bonn. Eligió esta última, la más tranquila y apta para su trabajo. Allí se traslada en abril de 1889. Su docencia en la universidad será reducida. Como le dice el representante del ministerio, "al prof. Hertz sólo le imponemos la obligación de dar la clase de física experimental y dirigir el laboratorio; ha de disponer de tiempo libre para sus trabajos y para concluir con tranquilidad sus historias de la propagación (de ondas)".

Lo que no le dejará tranquilo son los premios y honores que irá recibiendo, de las Academias de Berlín, París y Roma, y de Sociedades Científicas de Manchester, Ginebra, Erlangen, Gran Bretaña, San Petersburgo, Nápoles, Londres, Moscú, Bolonia, Cambridge, Turín... El mundo científico alemán le rinde el más solemne reconocimiento, ofreciéndole la conferencia central de la 62.ª Reunión de Científicos y Médicos Alemanes, celebrada en Heidelberg el 20 de septiembre de 1889, bajo el título "Sobre las relaciones entre luz y electricidad". Con una cierta perspectiva histórica, presenta allí sus trabajos como prueba del carácter óptico de su rayo de fuerza eléctrica, y por consiguiente del carácter electromagnético de la luz.

El trabajo de investigación de Hertz en Bonn durante el curso 1889-90 completa los trabajos experimentales de Karlsruhe, mediante trabajos teóricos sobre las ecuaciones básicas de la electrodinámica para cuerpos en reposo y en movimiento. Estos trabajos, incluidos en las famosas "Investigaciones sobre la propagación de la fuerza eléctrica" de 1892, ejercerán un influjo directo en el pensamiento del joven Einstein sobre la relatividad. A finales de noviembre de 1890 Hertz realiza un viaje a Londres y Cambridge, donde contacta, entre otros físicos, con los "maxwellianos" G. F. FitzGerald, O. J. Lodge y W. Thomson (Lord Kelvin), con quienes sólo había mantenido relación epistolar hasta entonces.

En marzo de 1891 emprende un nuevo tema teórico de investigación que le llenará los dos últimos años de su vida: sus *Principios de la mecánica.*

En ellos se propone suprimir de la mecánica las ideas oscuras, que la han dominado en planteamientos anteriores, como la idea de fuerza de la mecánica newtoniana, o la de energía potencial de la lagrangiana. Su mecánica se estructura sobre sistemas de puntos materiales, dotados de ciertas ligaduras, cuyos movimientos posibles equivalen al desplazamiento de un punto en un cierto espacio curvo de muchas dimensiones. En él se formula una generalización del principio de inercia que impone como movimiento real de ese punto una geodésica. Tal enfoque de la mecánica ha sido sugerente para los filósofos de las ciencias, pero no ha tenido para nuestra física o nuestra cultura el influjo que ciertamente ha tenido su descubrimiento de las ondas hercianas.

La enfermedad de Hertz había comenzado a manifestarse en el verano de 1892 como un pesado catarro, que hacía sospechar una simple fiebre del heno. "Actualmente, escribe gráficamente a sus padres, mi mundo es mi nariz." En octubre se siente incapaz de comenzar sus clases, y se ve obligado a someterse sucesivamente a dos intervenciones: una "gran operación de nariz" y un "escopleamiento del mastoides". Tras una lenta recuperación, en septiembre de 1893 ha de someterse a una tercera operación. El 9 de diciembre debe presentir próxima su muerte, cuando escribe a sus padres: "Si de verdad me pasa algo, no debéis entristeceros, sino estar más bien orgullosos, y pensar que pertenezco a los especialmente escogidos cuya vida es breve pero suficiente." El primero de enero de 1894, Heinrich Hertz sucumbía a una septicemia.

Las ondas hercianas han cambiado radicalmente la tecnología de nuestras comunicaciones. Se aplicaron inmediatamente a la telegrafía inalámbrica: Alexandr Popov en Rusia (1895), y sobre todo Guglielmo Marconi en Bolonia (1895), a través del Canal de la Mancha (1899) y a través del Atlántico (1901). Pronto se nos hicieron familiares en la radio, la televisión, y las comunicaciones vía satélite, que constituyen una verdadera noosfera planetaria. La radioastronomía descubre mensajes de estrellas y galaxias, y, analizando ondas hercianas milimétricas, el satélite *Cobe* nos informa incluso sobre el ruido de fondo cósmico.

Hertz calcula la forma de las ondas que salen de su oscilador, a partir de las ecuaciones de Maxwell

Escribe estas ecuaciones para un espacio vacío en el que no intervienen cargas ni corrientes; tal es prácticamente el espacio que rodea su oscilador. Y las escribe en forma simétrica, en la que se relacionan directamente entre sí las variaciones temporales y espaciales de los campos magnético y eléctrico. En nuestro formalismo vectorial, llamando **H** al campo magnético y **E** al eléctrico, se escriben:

$$\frac{1}{c}\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \nabla \times \mathbf{E}; \qquad \frac{1}{c}\frac{d\mathbf{E}}{dt} = -\nabla \times \mathbf{H};$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0; \qquad \nabla \cdot \mathbf{E} = 0;$$

Hertz escribe una quinta ecuación básica que expresa la energía electromagnética ε contenida en un cierto volumen V:

$$\varepsilon = \frac{1}{8\pi}\int_V (\mathbf{E}^2 + \mathbf{H}^2)\, dv;$$

A partir de esa expresión formula Poynting su teorema, que da la disminución de la energía en el volumen V como flujo a través de su superficie S del "vector de Poynting" **P**:

$$-\frac{d\varepsilon}{dt} = \oint_S \mathbf{P}\cdot d\mathbf{s}; \qquad \mathbf{P} \equiv \frac{c}{4\pi}\mathbf{H}\times\mathbf{E}.$$

Hertz resuelve las anteriores ecuaciones de Maxwell para el espacio que rodea su oscilador, respecto a cuyo eje el problema tiene simetría de revolución. Obtiene como resultado la siguiente ecuación de las líneas de fuerza del campo eléctrico en un "plano meridiano" que pase por ese eje:

$$Q = elk\left\{\cos(kr-\omega t) - \frac{\sin(kr-\omega t)}{kr}\right\}\sin^2\theta\,;$$

El oscilador ha sido idealizado como un dipolo, es decir, como dos partículas de carga $+e$ y $-e$ que oscilan a lo largo de ese eje, manteniéndose simétricas respecto al centro y alcanzando las elongaciones extremas $+l$ y $-l$. La frecuencia del oscilador (en la práctica de centenares de megahertz) está expresada por $2\pi\omega$, y ella determina el "número de ondas" $k = \omega/c$. Las líneas de fuerza han de representarse para sucesivos instantes t (dentro del período de centésimas de microsegundo). Cada línea de fuerza viene fijada por un valor del parámetro auxiliar Q, y está expresada en coordenadas polares: la distancia al centro del oscilador r, y el ángulo azimutal respecto al eje del oscilador θ.
El resultado gráfico está representado en la figura 6.

Pero, a mi juicio, aún es más profundo el impacto que el descubrimiento de las ondas hercianas ha tenido sobre la física misma. Ellas le han impuesto una segunda revolución conceptual. Porque el objeto de la física clásica, la de Galileo y Newton, eran los cuerpos o los corpúsculos. La electrodinámica añadía la carga eléctrica como propiedad de esos corpúsculos. Las ondas hercianas nos han dado un nuevo objeto a la física: el campo electromagnético. Y sin esta idea básica de campo, la evolución ulterior de la física relativista y cuántica resulta inconcebible.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HEINRICH HERTZ: LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. Manuel García Doncel y Xavier Roque, Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona y Edicions de la Universitat Politécnica de Catalunya, Bellaterra 1990.

ON THE PROCESS OF HERTZ'S CONVERSION TO HERTZIAN WAVES. Manuel G. Doncel, en *Archive for History of Exact Sciences*, n.º 43, páginas 1-27, 1991.

HEINRICH HERTZ'S LABORATORY NOTES OF 1887. H. G. Hertz y Manuel G. Doncel, en *Archive for History of Exact Sciences,* en prensa.

THE CREATION OF SCIENTIFIC EFFECTS: HEINRICH HERTZ AND ELECTRIC WAVES. Jed Z. Buchwald, The University of Chicago Press, en prensa.

Ciencia y empresa

Micobacterias

Porinas de la pared celular

La imagen típica que se tiene de una bacteria grampositiva es la de una célula procariota envuelta por una espesa capa de peptidoglucano que puede alcanzar hasta 80 nanómetros de espesor, en tanto que la bacteria gramnegativa presenta una capa de peptidoglucano mucho más fina, rodeada por una membrana externa. Pero hay bacterias grampositivas que tienen lípidos en la pared celular; pertenecen principalmente al grupo de las micobacterias.

Entre las micobacterias se encuentran patógenos muy importantes para el hombre. Recordemos *Mycobacterium tuberculosis* y *M. leprae,* agentes, respectivamente, de la tuberculosis y la lepra, además del complejo *M. avium-intracelular*; éste, junto con *M. tuberculosis*, constituyen las infecciones sistémicas bacterianas más frecuentes en enfermos con sida.

Si exceptuamos el caso de *M. leprae*, el número de infecciones producidas por micobacterias está aumentando en la mayoría de los países, industrializados o en vías de desarrollo. La terapia para tratar estas infecciones es lenta y no son muchos los fármacos antimicrobianos disponibles. Las micobacterias oponen resistencia natural a la inmensa mayoría de antibióticos. Por si fuera poco, crece el número de cepas resistentes a los antimicrobianos en uso.

A la baja permeabilidad de su pared celular se ha atribuido la resistencia micobacteriana a los antibióticos. No obstante ser grampositivas, las micobacterias tienen una gran cantidad de lípido en la pared celular; y se supone que la parte lipídica sería la responsable de la baja permeabilidad de la pared. Aunque no se conoce bien la organización de la capa lipídica, sí se sabe que difiere de la membrana citoplasmática de las células, así como de la membrana externa que encontramos en las bacterias gramnegativas. El principal componente lipídico de la pared celular está formado por los ácidos micólicos que se hallan unidos por enlaces covalentes al peptidoglucano a través de la unión de arabinanos y galactanos. Además de éstos, hay otros lípidos que están libremente asociados a la parte lipídica de la pared de las micobacterias.

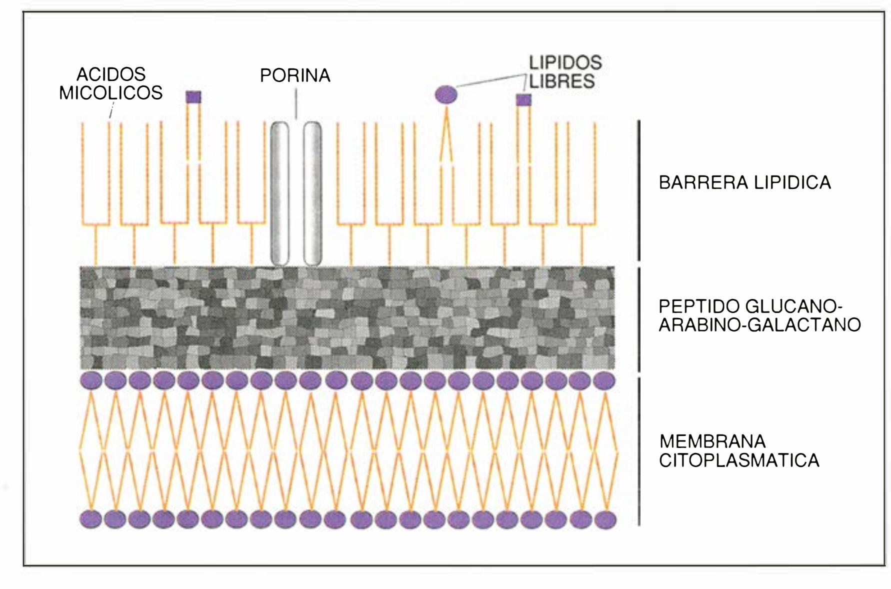
La barrera hidrofóbica impuesta por los lípidos ejerce el mismo efecto que la membrana externa de las bacterias gramnegativas y actúa como un potente obstáculo contra la permeabilidad. La baja permeabilidad de la pared celular tiene un efecto determinante en la acción de los antibióticos en las micobacterias. El flujo de antibiótico desde el medio exterior hacia sus dianas naturales en el interior celular es muy bajo y, en consecuencia, no basta la concentración de antibiótico en la célula para inhibir el crecimiento de ésta o provocar su muerte.

Para poder desarrollar nuevos fármacos antimicrobianos que actúen sobre las micobacterias, importa conocer los sistemas de transporte de la pared celular. La investigación reciente del autor, Vincent Jarlier, de la Universidad de París VI, y Roland Benz, de la Universidad de Wurzburgo, han demostrado que existen canales hidrofílicos en la pared celular de las micobacterias. Estos canales, constituidos por proteínas, permitirían el paso de moléculas de pequeño tamaño por difusión pasiva a través de la porción lipídica de la pared celular. Estas proteínas que atraviesan la pared celular micobacteriana comparten algunas propiedades con las porinas que se encuentran en la membrana externa de las bacterias gramnegativas, mitocondrias y cloroplastos y que son responsables del transporte pasivo a través de la membrana externa presente en estas células y orgánulos celulares. Pese a ser grampositivas las micobacterias, la existencia de porinas y de una gran cantidad de lípido sugiere que la parte lipídica de la pared celular se halla altamente organizada, probablemente a la manera de las membranas celulares.

La porina presente en la pared celular micobacteriana dispone de un solo canal lleno de agua, que permite el paso de moléculas de un lado a otro de la pared. Aunque el poro mide unos dos nanómetros de diámetro, estas proteínas no abundan en la pared celular, razón por la cual, y no obstante ese tamaño notable del poro, la permeabilidad de la pared celular es baja y las micobacterias oponen tanta resistencia a los antibióticos.

Los estudios desarrollados posteriormente por Trías y Benz, descritos en *The Journal of Biological Chemistry* en marzo del año pasado (los resultados precedentes aparecieron en *Science*), han demostrado que este canal tiene cargas negativas, lo que significa que los productos dotados de carga positiva pueden atravesar con mayor rapidez la pared celular. La apertura del canal está regulada por el voltaje: bastan pequeñas diferencias de potencial entre ambos lados del canal para cerrarlo y contribuir así a la baja permeabilidad de la pared celular.

La pared celular de las micobacterias es la menos permeable de los procariotas, se trate de bacterias grampositivas o gramnegativas. En esta situación, revisten especial interés las vías de transporte que existen en la pared celular,



Pared de micobacteria

pues constituyen la puerta de entrada de agentes antimicrobianos en la célula. La profundización en las vías de difusión permitirá el desarrollo de nuevas moléculas activas contra las micobacterias. (*Joaquim Trias, de la Universidad de Barcelona.*)

Fiabilidad informática

Sea precavido

El químico, el médico o el sociólogo cuyas investigaciones hayan proporcionado una cantidad respetable de datos o de mediciones querrá obtener de ellos inferencias estadísticamente válidas. Querrá saber, por ejemplo, si las magnitudes A y B son proporcionales, si es posible atribuir las oscilaciones en los valores de C a las que presentan A y B y hasta qué punto se puede asegurar que esa presumible correlación no se deba a la casualidad o a falta de precisión a la hora de efectuar las mediciones.

Lo que no suele querer es tener que convertirse en especialista en estadística para hacerlo. Le gustaría confiar sus datos a cualquiera de los paquetes estadísticos que abundan en el mercado informático y obtener, sin más, los resultados correctos. Pero precisamente esto es lo que puede resultar peligroso.

Dos grupos de trabajo, el de "Estadística computacional" de la Sociedad Biométrica y el de "Sistemas estadísticos de evaluación" de la Sociedad alemana de Informática médica, Biometría y Epidemiología (GMDS), han analizado el problema con detenimiento. En los tres últimos años, los expertos han estudiado el margen de confianza numérica de los paquetes informáticos BMDP, Data Desk, Excel, GLIM, DISP, SAS, SPSS, S-PLUS y Statgraph. Sus conclusiones, reunidas en el informe titulado "Fiabilidad numérica de los sistemas de análisis de datos", han sido entregadas para su publicación a la revista *Computational Statistics and Data Analysis.* Utilizaron para sus pruebas un conjunto de datos ficticios dotado de ciertas propiedades que la experiencia muestra son útiles para la evaluación de problemas numéricos.

Los resultados fueron pavorosos: ninguno de los programas funcionaba de forma que se le pudiera dejar en manos inexpertas. Ante sencillos problemas de valor promedio o de desviación típica, que pueden resolverse fácilmente con papel y lápiz, algunos programas ofrecieron resultados erróneos en varios órdenes de magnitud. Otros llegaban a proporcionar valores numéricos de magnitudes inexistentes, como medias de variables para las que no tenían datos. Cuando se intentó que dibujaran una curva que atravesase nueve puntos dados, la mayoría fracasó de manera lastimosa. En algún caso, el trazado de la curva dependía incluso del orden en que se introdujeran los nueve puntos.

De manera harto sorprendente, hay casos en que un mismo programa puede dar resultados distintos al ejecutarse en ordenadores diferentes (uno de los motivos por los que la investigación resultó mucho más larga y laboriosa de lo previsto). Por tanto, no sólo hay que desconfiar de los resultados ofrecidos, sino que ni siquiera cabe suponer que un colega de otra universidad que utilice el mismo programa con los mismos datos obtenga los mismos resultados.

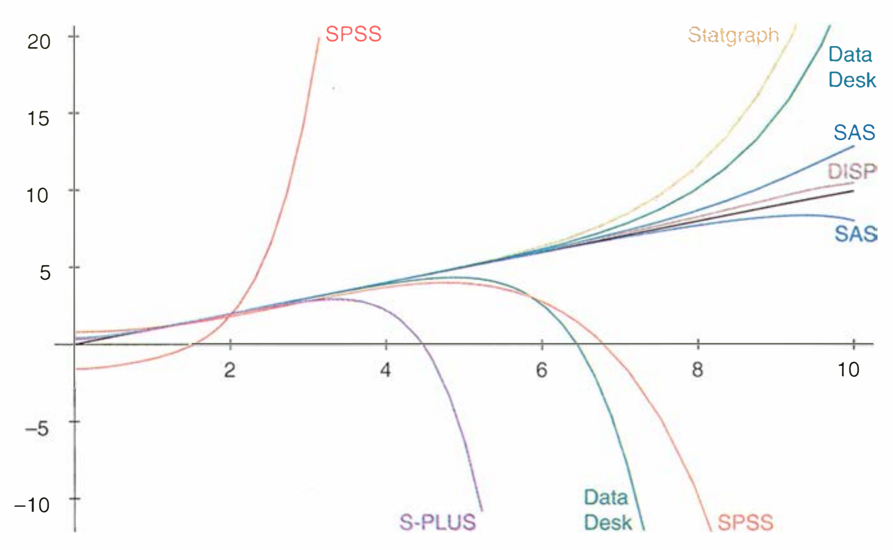
Lo que se proponían estos grupos de trabajo no era realizar una prueba comercial de las usuales, ni emitir valoraciones del tipo "recomendable" o "desaconsajable". Antes bien, trataban de someter los programas a un examen previo del tipo realizado en las fases finales de su desarrollo, con la esperanza de que sus fabricantes los mejorasen. De hecho, algunas de las casas comerciales aceptaron de buen grado las críticas y prometieron versiones futuras mejoradas, mientras que otras se mostraron más reticentes. Por ahora, lo único que los investigadores pueden recomendar a los consumidores es precaución.

¿Cómo puede explicarse esta situación? Ante todo por los mecanismos de mercado: interesa más la rapidez que la calidad. En muchos casos, los defectos del programa tendrían fácil solución mediante mensajes de error más claros, mejor redacción de los manuales de uso y un poco más de cuidado al establecer las formas de introducción de datos y de presentación de resultados.

Por otra parte, muchas de estas dificultades no son nuevas ni propias de la estadística, sino inherentes al propio cálculo. (Ello hace muy probable que programas para otras finalidades, sometidos a la misma prueba, arrojasen resultados igualmente pobres.) Los calculistas manuales de principios de siglo ya conocían remedios adecuados, pero es fácil dejarse llevar por la ilusión de la mayor precisión de cálculo del ordenador y suponer que tales problemas han desaparecido.

Es imposible por principio que un programa pueda procesar, con absoluta corrección, cualquier tipo de dato, pues para ello tendría que calcular con precisión ilimitada, cuando tanto el tiempo de cálculo como el espacio para almacenamiento de que dispone son finitos. Debemos, pues, aceptar que todo programa tiene sus limitaciones.

Pero estas limitaciones no resultan evidentes sin más a quien lo utiliza,



*Diversidad de los resultados obtenidos por varios programas comerciales de estadística al realizar parte del "Statistics Quiz" de Leland Wilkinson. En este caso se trata de una interpolación: hay que buscar un polinomio de grado nueve que se ajuste a nueve puntos dados situados sobre una recta, pero que no contenga ningún término de primer grado. Sin este último requisito la solución del problema es elemental, pues una recta es un polinomio de grado uno, o, lo que es lo mismo, un polinomio de grado nueve cuyos términos del segundo al noveno son todos cero. Tal como está planteado, el problema tiene una solución única, pero muy sensible a pequeños errores de redondeo. La solución correcta sigue el trazado de una recta en el intervalo de uno a nueve, con desviaciones inapreciables (*en negro*). Los programas no reseñados ofrecieron resultados aceptables*

por lo que debería exigirse, sobre todo en el caso de productos destinados a personas inexpertas, que el programa rechace el procesamiento de datos que le desborden y que además lo aclare de forma explícita, para que el usuario sepa a qué atenerse y pueda, por ejemplo, volver a replantearse sus supuestos teóricos. No es aceptable que, en semejante situación, el computador se limite a ofrecer un listado de resultados cualesquiera, que hasta puede incluso que parezcan verosímiles e induzcan a error a quien los solicitó.

En tercer lugar, los programas no pueden modificar algunas características básicas de las máquinas en las que se ejecutan más que a costa de tiempos de ejecución mayores. El caso más típico es el del redondeo de resultados parciales. Si multiplicamos dos números de ocho cifras, obtendremos un resultado de dieciséis cifras, que deberá ser reducido de nuevo a ocho, si ése es el límite en que nos movemos. La decisión de cómo y cuándo redondear puede que influya mucho en el resultado.

Llegados a este punto hay dos opciones. Una es remitirse a los métodos de redondeo estándar incorporados al soporte físico, que varían en función del computador con que trabajemos. Esto explica que se puedan obtener resultados distintos si utilizamos el mismo programa en dos tipos de ordenador diferentes. La otra posibilidad es incorporar al programa procedimientos específicos de redondeo, lo que aumenta la duración de los cálculos y, quizá por ello, no es lo más habitual.

Resulta paradójico que los algoritmos de redondeo de los computadores más grandes tiendan a ser peores que los de los ordenadores personales corrientes. La causa hay que buscarla en que, aunque también existen métodos nuevos y mejores para ellos, la velocidad de ejecución tiene un gran peso en las pruebas de evaluación rápida habituales (los llamados contrastes o "benchmarks"). Como los resultados de referencia se obtuvieron con los métodos antiguos, peores pero más rápidos, el cambio resulta poco atractivo comercialmente.

Es la misma razón que dificulta la adopción de mejores algoritmos de redondeo por los compiladores, los programas que transcriben otros programas, escritos en algún lenguaje de programación, a instrucciones comprensibles por la máquina. Tampoco las recomendaciones del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers de Estados Unidos) sobre representación numérica son de aceptación general en el mundo de los grandes ordenadores. *(Christoph Pöppe)*

Problemas numéricos de las valoraciones estadísticas

Leland Wilkinson, profesor de la Northwestern University estadounidense y propietario de Systat, empresa productora de programas, publicó en 1985 su "Statistics Quiz" o acertijo estadístico. Se trata de un conjunto de datos ficticios, con los correspondientes ejercicios propuestos, cuya finalidad es poner a prueba las limitaciones de los programas de estadística. No son más que series de números que cualquier persona capta a primera vista y que difícilmente podrían tomarse por mediciones reales. Pero las que sí lo son suelen plantear problemas muy parecidos a los programas estadísticos.

Imaginemos, por ejemplo, a un químico que quiere investigar un compuesto desconocido, llamémosle *X*. Diseña su experimento de manera que un líquido que contiene *X* gotee de manera regular sobre los reactivos de un recipiente. Cada cierto intervalo de tiempo extrae muestras del líquido (bien mezclado), que analiza en distintos aparatos según el producto buscado. Como resultado obtiene la tabla de valores adjunta.

En el lugar de los epígrafes Pequeño, Enorme, Infimo, etc., debemos imaginarnos substancias químicas; los nombres que les dio Wilkinson hacen referencia a sus propiedades numéricas problemáticas. El aparato de medición que nuestro químico imaginario tiene adaptado a su ordenador ha registrado bajo la variable "Grande" la hora exacta de la recogida de cada muestra. Por razones que no conocemos, la cuenta se inició hace mucho tiempo, por lo que las anotaciones horarias empiezan todas con siete nueves, de manera que la cifra realmente significativa es la última, la octava. Nada objetable hay en ello, pues lo importante desde el punto de vista químico son las diferencias e intervalos temporales, no un origen arbitrario.

La variable "X" podemos entenderla como el número de gotas que han caído en el recipiente y "Cero" como uno de los productos que queríamos analizar, pero que no se obtiene, de donde la lectura negativa del aparato. El instrumento que debía registrar la presencia del segundo producto está estropeado y por ello no emite señal alguna (marcamos ese resultado con un grueso punto negro). La substancia "Pequeño" ya se hallaba presente en el matraz por impurezas de los reactivos y su concentración se incrementa muy poco. El aparato encargado de registrar la presencia de "Enorme" no mide concentraciones, sino moléculas. 1.0E+12 es la forma usual en computación de escribir 10^{12}. Tras el primer análisis se encontraron 10^{12} moléculas de "Enorme". En cambio, la substancia "Infimo" se mide en kilogramos. Guarismos del tipo de 10^{12} o 10^{-12} son habituales en física y química. En fin, del último producto ya había algo antes de empezar el goteo, en cantidades comparables a las añadidas por la reacción.

X	CERO	FALTA	GRANDE	PEQUEÑO	ENORME	INFIMO	REDONDEO
1	0	•	99999991	0.99999991	1.0E+12	1.0E-12	0,5
2	0	•	99999992	0.99999992	2.0E+12	2.0E-12	1,5
3	0	•	99999993	0.99999993	3.0E+12	3.0E-12	2,5
4	0	•	99999994	0.99999994	4.0E+12	4.0E-12	3,5
5	0	•	99999995	0.99999995	5.0E+12	5.0E-12	4,5
6	0	•	99999996	0.99999996	6.0E+12	6.0E-12	5,5
7	0	•	99999997	0.99999997	7.0E+12	7.0E-12	6,5
8	0	•	99999998	0.99999998	8.0E+12	8.0E-12	7,5
9	0	•	99999999	0.99999999	9.0E+12	9.0E-12	8,5

Electrocardiografía de alta resolución

Pulso a pulso

El registro del electrocardiograma (ECG) se ha convertido en una práctica rutinaria de la actividad clínica. Mediante el mismo, el cardiólogo dispone de una herramienta eficaz de evaluación del comportamiento cardíaco. El ECG suele obtenerse con electrodos superficiales, localizados en la piel con posiciones estandarizadas, y la señal recogida (con amplitud de aproximadamente 1 milivolt) es amplificada 1000 veces antes de ser registrada en el electrocardiógrafo sobre papel.

El perfil del ECG muestra así tres partes diferenciadas: la onda *P*, correspondiente a la despolarización de las aurículas; el complejo QRS, debido a la despolarización de los ventrículos; y la onda *T*, de repolarización de los mismos. La morfología,

AÑO	PRODUCTO INTERIOR BRUTO (MILES DE $)	INDICE DE PRECIOS	POBLACION EN EDAD LABORAL	PARADOS (MILES)	SOLDADOS (MILES)	EMPLEADOS (MILES)
1947	234.289	83,0	107.608	2356	1590	60.323
1948	259.426	88,5	108.632	2325	1456	61.122
1949	258.054	88,2	109.773	3682	1616	60.171
1950	284.599	89,5	110.929	3351	1650	61.187
1951	328.975	96,2	112.075	2099	3099	63.221
1952	346.999	98,1	113.270	1932	3594	63.639
1953	365.385	99,0	115.094	1870	3547	64.989
1954	363.112	100,0	116.219	3578	3350	63.761
1955	397.469	101,2	117.388	2904	3048	66.019
1956	419.180	104,6	118.734	2822	2857	67.857
1957	442.769	108,4	120.445	2936	2798	68.169
1958	444.546	110,8	121.950	4681	2637	66.513
1959	482.704	112,6	123.366	3813	2552	68.655
1960	502.601	114,2	125.368	3931	2514	69.564
1961	518.173	115,7	127.852	4806	2572	69.331
1962	554.894	116,9	130.081	4007	2827	70.551

Tras un corto análisis, se observa que la situación es bien sencilla: las magnitudes registradas son proporcionales a X (en una constante aditiva). Si elaboramos un gráfico con una de ellas como abscisa y cualquier otra como ordenada, siempre obtendremos una recta.

Lo que no escapa a una persona observadora provista de papel y lápiz, puede representar un serio problema para un programa de ordenador. Su precisión —el número de cifras significativas que puede almacenar y con las que opera— es limitada. Para problemas sencillos lo habitual es que actúen con una precisión de seis a ocho decimales, en función de los soportes empleados. Puede suceder entonces que valores como "Grande" y "Pequeño" sean redondeados a una sola cifra ya desde la entrada misma del dato y se desvirtúe totalmente su significado. Algunos de los programas estadísticos estudiados no informan con claridad sobre la precisión con que operan.

Otros emplean una notación desafortunada a la hora de dar los resultados. Así, en lugar de imprimir en pantalla un número como 8.1571859E-5 (los computadores usan puntos en vez de comas, y a esto se le llama notación de punto flotante), utilizan la más rígida notación de punto fijo, indicando 0.000081571859. Si en este caso trabajásemos con una precisión de seis decimales, sólo nos quedarían dos cifras significativas.

Aun cuando los datos se hayan introducido correctamente, la limitación de la precisión puede causarnos problemas. Una operación muy corriente en los análisis es hallar la diferencia entre dos valores de la misma variable. En nuestro ejemplo, la inclinación de la recta (llamada recta de regresión) es un cociente de tales diferencias. Algo parecido es aplicable a su representación gráfica.

Si restamos dos de los valores de la variable "Pequeño", sólo nos quedará una cifra significativa de las ocho iniciales. Esta es la llamada pérdida de cifras significativas, tan temida en cálculo numérico. Si se produce en cualquier fase del proceso de cálculo, la pérdida de precisión continuará hasta el resultado final. En nuestro caso, en todos los resultados que impliquen la resta de dos valores de la variable "Pequeño" sólo una cifra será significativa.

La pérdida de cifras significativas puede evitarse en algunos casos mediante una reordenación adecuada de las operaciones. En nuestro caso, empero, es inevitable, pues las diferencias ya suponen la conservación de una sola cifra, de un único decimal, antes de cualquier otra operación; es imposible mayor precisión en variables como "Grande" y "Pequeño".

Todo esto es de fácil comprobación, sin usar ningún programa estadístico, en el caso del artificioso ejemplo planteado. Pero la pérdida de cifras significativas puede producirse también a lo largo de la elaboración posterior. En conclusión, hay datos experimentales que no permiten responder determinadas preguntas razonables, sin que quepa achacárselo al estadístico que realiza el análisis. Y no se trata de pura teoría. La tabla adjunta nos muestra una serie de datos sobre la población estadounidense, recolectados por J. W. Longley en 1967 (*Journal of the American Statistical Association*, tomo 62, páginas 819 a 841).

Los datos de la tabla reflejan múltiples factores: la guerra de Corea y el crecimiento económico concomitante, la inmigración, el aumento de la población y otras. Las correlaciones son muy estrechas: como en la prueba de Wilkinson, obtendríamos rectas con desviaciones mínimas al poner una variable en función de cualquier otra (salvo las fechas). En principio, parece razonable considerar el número de parados en función de la población total y de los valores del producto interior bruto, como indicador general de la coyuntura. Sólo la evaluación de los datos nos enseña que la acción de ambas magnitudes condicionantes no se puede explicar por separado. Es peregrino querer precisar si hay que buscar el origen de los valores de parados más en la tasa poblacional o en el producto interior bruto, porque ambos apuntan en la misma dirección.

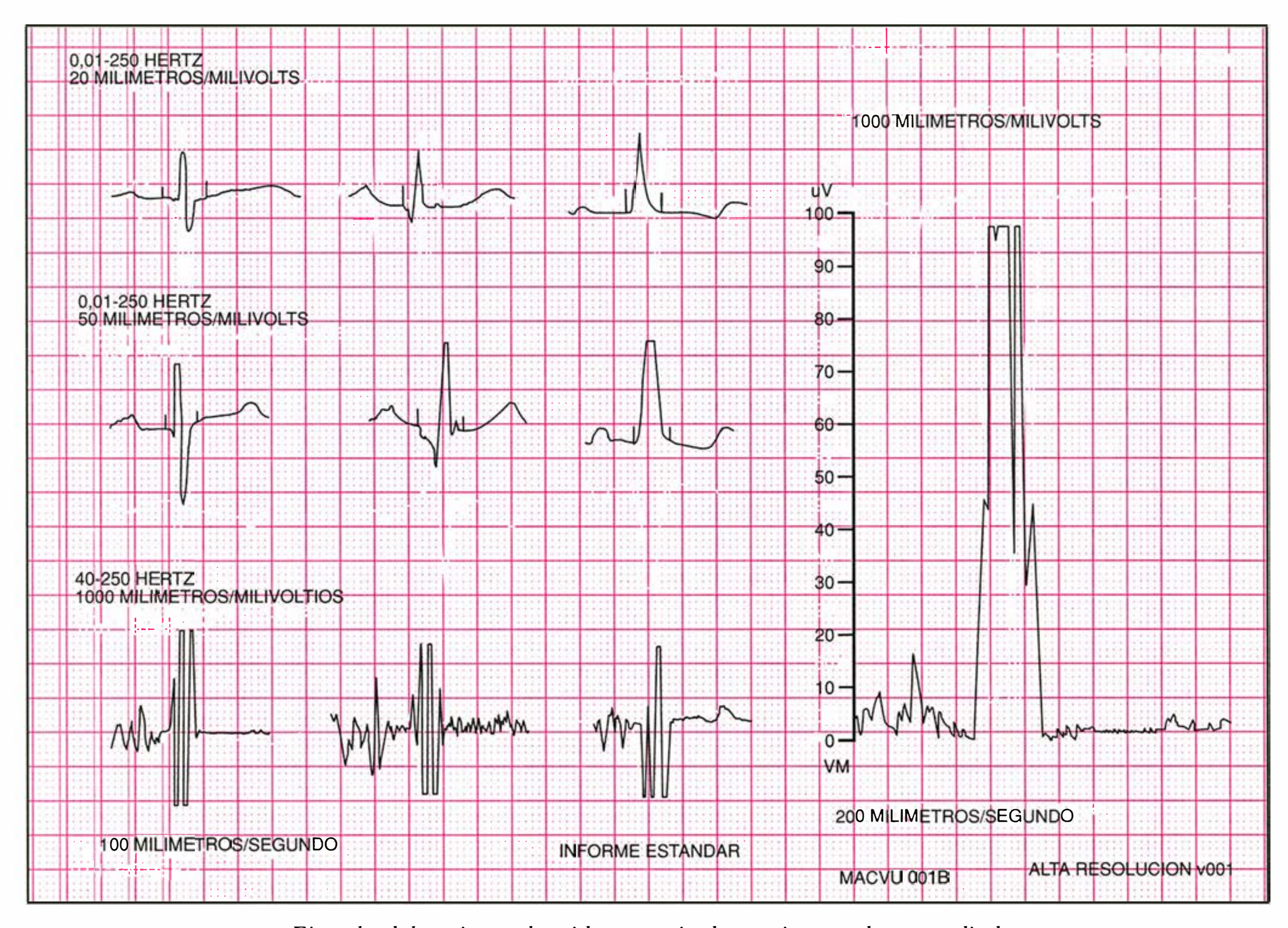
Así pues, los datos no ofrecen ninguna base sólida sobre la que calcular las respectivas e intrincadas interrelaciones. Si intentamos que, pese a ello, un programa las evalúe, es muy probable que los resultados que obtengamos dependan de errores de redondeo en la última cifra significativa.

amplitudes y duraciones de estas ondas, así como los intervalos entre ellas, proporcionan la información deseada.

No obstante, y como ya apuntaban Cranefield y Hoffman en 1968, el ECG convencional proporciona poca información directa sobre la actividad cardíaca, obviando algunos episodios cruciales de la misma. Dichos eventos (del orden del microvolt) se hallan enmascarados en la línea basal o equipotencial del ECG estándar.

La electrocardiografía clásica es a la electrocardiografía de alta resolución lo que el microscopio óptico, que permite sólo observar los aspectos generales, es al microscopio electrónico, que descubre pormenores específicos. Podemos, pues, definir la electrocardiografía de alta resolución (EAR) como la técnica gracias a la cual podemos detectar y analizar señales electrocardiográficas de baja amplitud, imposibles de detectar sobre la superficie del cuerpo por los procedimientos habituales.

La EAR se introdujo a principios de los años setenta. El objetivo era la captación de la señal del sistema His-Purkinje, que proporciona información sobre la localización de problemas en la conducción atrioventricular. Hacia mitad de la década, El-Sherif, Scherlag y Lazzara apuntan la hipótesis según la cual potenciales de pequeña amplitud observados a partir del final del complejo QRS (denominados usualmente pospotenciales o potenciales tardíos) pueden identificar a los pacientes con alto riesgo de taquiarritmias ventriculares malignas y, por tanto, de muerte súbita. Otras señales estudiadas por la EAR son la actividad del nodo sinu-



Ejemplo del registro obtenido a partir de un sistema de promediado

sal (que constituye el marcapasos natural del corazón, fijando su ritmo de activación), prepotenciales de la onda *P* y la señal del nodo auriculoventricular.

Compete a la EAR obtener una señal de muy baja amplitud (necesitada quizá de ser amplificada centenares de miles de veces) con la mejor razón de señal a ruido (S/N) posible. Las fuentes de ruido son diversas, pero pueden agruparse en cuatro grupos primarios: la señal de 50 hertz de la red de alimentación; el ruido de interfase entre electrodo y piel; el propio amplificador, y los potenciales electromiográficos, debidos a la actividad muscular (respiración y otros).

Las fuentes de ruido superan en amplitud a la propia señal útil, y sus contenidos frecuenciales se hallan solapados con los de ésta, haciendo inviable la posibilidad de eliminación por filtrado. Se han desarrollado diversas técnicas de mejora de la S/N. El promediado de señal constituye una de las habituales. Usada inicialmente para distinguir del ruido las señales electroencefalográficas, fue introducida en el campo de la electrocardiografía en 1963 por Hon para extraer el ECG del feto del de la madre. En 1973, recurrieron a ella los grupos de Flowers, Stopczyk y Berbari en registros del haz de His.

El promediado de señal es una técnica de procesado, digital casi siempre, en la que se mejora la relación S/N de formas de onda que se repiten periódicamente por medio de una sumación sucesiva. Al promediar, las componentes aleatorias de la onda (el ruido), se reducen en un factor *n* (siendo *n* el número de pulsos promediados), mientras que las componentes determinísticas (la señal deseada) permanecen inalteradas. El método requiere una referencia, que puede ser un estímulo sensorial en el caso de potenciales evocados cerebrales o la onda *R* en el caso del ECG, y es óptimo si el ruido no guarda correlación alguna, la señal útil es invariante con el tiempo y el intervalo entre el punto de referencia y el de interés permanece constante.

En los últimos años, la técnica de promediado de señal se ha estandarizado, sobre todo para el estudio de pospotenciales del QRS, debido a su importancia como marcador de arritmias severas y muerte súbita en pacientes que han sufrido un infarto. El estudio del ECG-EAR promediado se realiza en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia, mediante un registro simultáneo de las tres componentes *X-Y-Z* del vector cardíaco. Se extraen por procesado digital de la señal una serie de parámetros complementarios que permiten un diagnóstico de presencia o ausencia de potenciales tardíos. El proceso está ampliamente difundido, y diversos fabricantes han desarrollado dispositivos para su obtención.

La principal limitación de la técnica de promediado de señal, consustancial con ella misma, es la imposibilidad de detectar cambios dinámicos latido a latido, como ocurre algunas veces con los pospotenciales comentados. Esto ha dado origen a otra rama de la EAR, paralela a la técnica de promediación, y que suele denominarse EAR pulso a pulso. Como su nombre indica, el estudio del registro de alta resolución obtenido se realiza con cada pulso individual. Ello exige recurrir a otros métodos para mejorar la relación

S/N, como el promediado espacial (en el cual se adquieren n señales simultáneas del ECG tomadas con electrodos múltiples o matriciales, realizándose el promediado de todas ellas analógicamente), sincronización por coherencia de fase, uso de electrodos especiales e incluso la utilización de pantallas de Faraday para evitar ruido electromagnético externo. La EAR pulso a pulso es, en principio, más potente que la técnica de promediado de señal; varios grupos de investigación han alcanzado ya resultados prometedores, pero las dificultades inherentes a su aplicación la hacen todavía inviable desde el punto de vista clínico. No obstante, los avances constantes en bioinstrumentación electrónica pueden convertirla a medio plazo en la alternativa en el campo de la EAR. (*José Espí López* y *Juan Guerrero Martínez, de la Universidad de Valencia.*)

Odontología

¿Sacar o rellenar?

Al fin, biotecnología para todo el mundo. Será quizá menos noble que la terapia génica para enfermedades raras y menos impresionante que una cura para el cáncer, pero el último producto de Creative BioMolecules, si da resultado, hará sonreír a mucha gente. Esta empresa, de Hopkinton, Massachusetts, está probando en seres humanos un compuesto proteínico que en los monos parece rescatar dientes condenados a una endodoncia segura.

La muerte de un diente es una experiencia corriente, demasiado corriente. Cuando el desgaste o un golpe abren un agujero que perfora las duras capas mineralizadas de esmalte y dentina, la pulpa descubierta, que aloja finas arterias y nervios sumamente sensibles, puede infectarse. Los dientes afectados por abscesos graves, que queden fuera de las posibilidades actuales de la medicina, deben ser extraídos. Pero cuando se actúa a tiempo en la pulpa descubierta, antes de que la infección la haya dañado, la odontología tradicional puede salvar la pieza. Absorbiendo la pulpa a través del canal de la raíz y reemplazándola con gutapercha o algo similar, se mata el diente, pero se preserva su función.

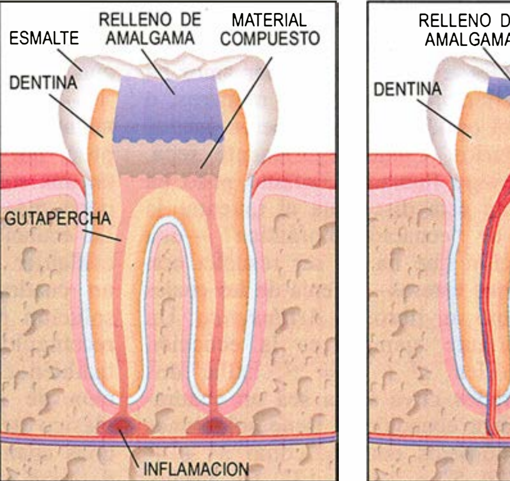
Creative BioMolecules cree tener una alternativa menos destructora, menos cara y —maravilla de maravillas— menos penosa para unos tres millones de esos casos, el 20 o 25 por ciento menos infectados. El tratamiento usa una versión cultivada de la proteína osteogénica humana OP-1. Los médicos saben desde hace años que, cuando es aplicada a huesos fracturados, la OP-1 estimula el crecimiento del hueso. Stryker, asociada a Creative BioMolecules, está ensayándola en pruebas clínicas con pacientes humanos.

R. Bruce Rutherford se preguntó si la OP-1 podría también servir para reparar dientes dañados. El año pasado, junto con científicos de BioMolecules, emprendió un experimento. Taladraron 30 agujeros profundos en los dientes sanos de cuatro macacos adultos, y después taponaron cinco cavidades artificiales con hidróxido cálcico, relleno dental corriente, y otras cinco con una pasta de colágeno, preparada con huesos de bovino. Las restantes, o las dejaron vacías, o las rellenaron con diversas cantidades de colágeno a las que se había añadido una pequeña cantidad de OP-1. Todas las cavidades se taparon a continuación.

Al cabo de seis semanas, los investigadores extrajeron los dientes y hallaron que todos los que habían sido rellenados con OP-1 habían desarrollado nuevas capas de dentina suficientemente gruesas para proteger la pulpa de la infección. Tres de los dientes rellenos con hidróxido de calcio mostraron también alguna recuperación de la dentina, pero era frágil e invadía la cavidad pulpar. Ninguna de las otras pruebas de control sanó.

"No decimos que sepamos cómo opera esta proteína", admite Victor A. Jedege, vicepresidente de Creative BioMolecules. El tejido que crece para sellar la cavidad "no se parece a la dentina normal", indica Rutherford. "Recuerda a lo que llamamos dentina esclerótica". Mientras que la dentina normal está atravesada por túbulos de fluido, la dentina reparativa es más amorfa. Ello podría ser bueno. "Quizá haga la pulpa menos sensible y no tan susceptible a la degradación", conjetura Rutherford.

Tentada por el mercado potencial del producto —tres millones de tratamientos al año a "algo menos de 1000 dólares" cada uno, dice Jedege—, Creative BioMolecules no va a esperar la respuesta a la pregunta de "cómo". En julio, la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) aprobó los planes de esta empresa de poner a prueba el compuesto (que la FDA clasifica como "recurso") en 40 pacientes humanos cuyos dientes tengan una inflamación mínima y que de todas maneras hayan de ser extraídos. En cada paciente se cortará una porción de la pulpa descubierta, y el hueco se rellenará con la mezcla colágeno/OP-1 o, a modo de control, con colágeno sólo. La firma espera disponer de los resultados muy pronto y —suponiendo que el fármaco dé resultado— pasar rápidamente a pruebas a mayor escala con pacientes que deseen conservar sus dientes.



En la endodoncia se sustituye la totalidad de la pulpa de un diente por goma (izquierda). *Una alternativa menos penosa podría consistir en eliminar sólo la pulpa infectada y cubrir el hueco con OP-1, que regenera la dentina para sellar la herida* (derecha)

Las empresas de biotecnología han rehuido la estomatología hasta ahora. Si Creative BioMolecules tiene éxito en comercializar un producto que se venda bien, puede que se invierta esta tendencia. "Creemos que la terapéutica dental ofrece buenas perspectivas comerciales", dice Charles Cohen, presidente de la firma. (*W. Wayt Gibbs*)

Juegos matemáticos

Ian Stewart

El último viaje de Fermat por el tiempo

Era una tarde cálida de finales de junio. Me acomodé en una tumbona del jardín para leer el periódico. En primera, la noticia de que Andrew Wiles, de la Universidad de Princeton, había resuelto uno de los grandes problemas de las matemáticas: el último teorema de Fermat. Wiles anunció el resultado al concluir la última de tres disertaciones, inocentemente tituladas "Formas modulares, curvas elípticas y representaciones de Galois". El público que abarrotaba la sala sospechaba que Wiles se guardaba en la manga el teorema de Fermat. No le faltaba razón. Oí un raro zumbido. Alcé la mirada, y en el césped del jardín vi posado un extraño artilugio de cristal y metal reluciente. Había un hombre sentado a los mandos. Vestía toga negra y sujetaba con una cinta sus cabellos largos. Bajó del artefacto y se presentó como Pierre de Fermat.

—Habrá de perdonarme —balbuceé. Creía que había usted muerto hace tres siglos.

—¡Cielos, no! Acabo de encontrarme con un caballero muy interesante. Me dijo que se llamaba H. G. Wells. Tal vez le conozca usted.

—Algo sé de él, sí —conseguí articular con un nudo en la garganta.

—Me aseguró que procedía del futuro, pero a mí no me parecía posible. Así que me prestó esta máquina. Ahora veo que decía la verdad.

—Ha llegado usted en el momento más oportuno —le dije—. Acaba de ser demostrado su último teorema.

—¿Mi qué...?

—¿No recuerda usted haber dejado una nota en el margen de su ejemplar de la *Arithmetica*? Usted escribió: "La resolución de un cubo en suma de dos cubos, de una cuarta potencia en suma en dos cuartas potencias, y en general, de cualquier potencia superior a la segunda en suma de dos de la misma clase, es imposible; hecho del cual he hallado una notable demostración. El margen es demasiado estrecho para contenerla."

—Ya me acuerdo, sí.

—Con simbolismo algebraico, usted decía que si n es un número entero mayor que dos, y si x, y, z son números enteros no nulos, entonces la ecuación $x^n + y^n = z^n$ carece de soluciones. Esta conjetura ha dado en ser conocida como último teorema suyo porque durante muchos años ha sido la única de las proposiciones de usted que no había sido ni demostrada ni refutada por los matemáticos que le sucedieron. Nadie ha sabido reconstruir su presunta "notable demostración". Durante más de tres siglos, las mejores mentes matemáticas del mundo han estado bregando con este último teorema, logrando progresos, pero sin poder nunca rematarlo del todo... hasta esta sensacional demostración de Andrew Wiles.

Le mostré a Fermat el periódico y esperé a que él digiriese la noticia.

—¿Tenía usted una demostración?

—No tenga tanta prisa. Antes de que yo revele mi secreto, explíqueme los desarrollos que han culminado en la demostración de mi modesta conjetura.

—De acuerdo —respondí—, pero antes ha de contarme usted cómo dio con su último teorema.

—Desde luego. Mi primer amor ha sido siempre la teoría de números, o sea, el estudio de los números enteros ordinarios. Como seguramente sepa, un griego llamado Diofanto puso en marcha esta disciplina al inventar la idea de "ecuación diofántica" —una ecuación que ha de ser resuelta con números enteros— acerca de las cuales escribió un libro, la *Arithmetica*. Un importante ejemplo es la ecuación pitagórica, $x^2 + y^2 = z^2$: hallar dos cuadrados cuya suma sea un cuadrado. Esta ecuación sí tiene soluciones con números enteros, como $3^2 + 4^2 = 5^2$ y $5^2 + 12^2 = 13^2$. De hecho, para esta ecuación existen infinitas soluciones con números enteros.

"Allá por 1637 estaba yo leyendo a Diofanto y reflexionando sobre la ecuación pitagórica. Se me ocurrió preguntarme qué ocurriría si en lugar de cuadrados probase con cubos. Al principio experimenté con casos sencillos: ¿es $1^3 + 2^3$ un cubo perfecto? No, pues la suma es 9. ¿Es $2^3 + 3^3$ un cubo? Tampoco. A veces fallaba por poco: $9^3 + 10^3 = 1729$, mientras que $12^3 = 1728$; pero no pude encontrar ninguna solución, salvo las carentes de interés, como $0^3 + 1^3 = 1^3$, en las que uno de los números es cero. Mis repetidos fracasos al tratar de hallar una solución me llevaron a mi modesta conjetura.

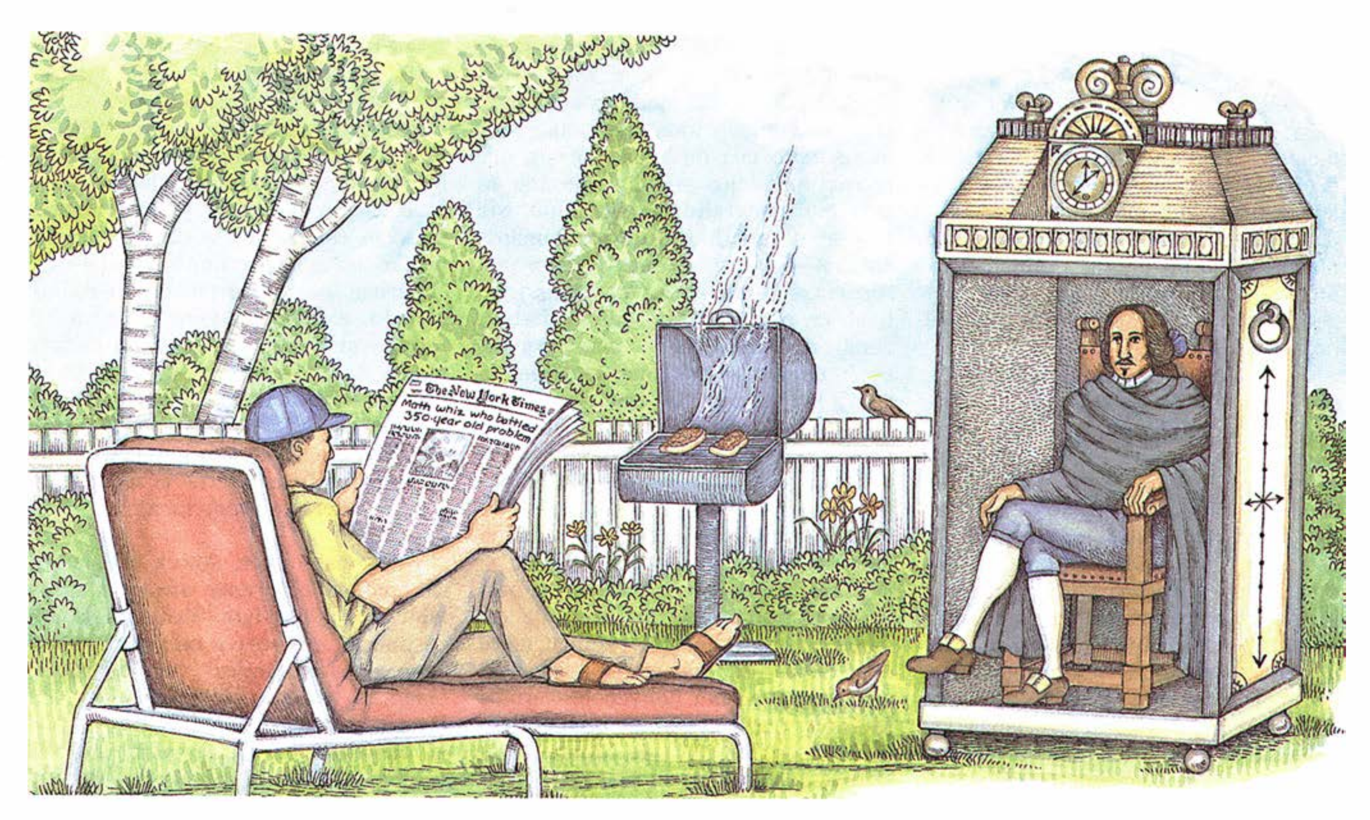
—Muy bien. Permítame pues que empiece a explicarle cómo ha sido demostrada —dije yo—. Como sabe, los únicos casos que es preciso tratar son el de que n sea 4 o el de cuando n sea primo.

—En efecto. Por ejemplo, cada 15-ésima potencia es también un cubo perfecto, por lo que cualquier solución para la 15-ésima potencia es automáticamente una solución para cubos.

—Justamente. Con símbolos, $x^{15} = (x^5)^3$, por lo que si se tuviera $x^{15} + y^{15} = z^{15}$ también $(x^5)^3 + (y^5)^3 = (z^5)^3$. Dado que cualquier entero mayor que dos es divisible por cuatro o por un número primo impar, el mismo argumento muestra que las únicas potencias que es preciso investigar son cuatro y los números primos impares. Usted mismo abrió el camino al dar una demostración para las cuartas potencias, o sea, para el caso $n = 4$.

—Sí, estoy orgulloso de aquello, mi método de "descenso infinito". Supuse, por razones tácticas, que existía una solución para una ecuación un poco más general, la $x^4 + y^4 = z^2$. La ecuación es más general, porque cualquier cuarta potencia es también un cuadrado. Observé que una tal solución proporcionaría un triángulo rectángulo dos de cuyos lados serían también cuadrados [véase la ilustración de la página 88]. Apliqué el clásico teorema de Pitágoras, hice unas cuantas deducciones sencillas y descubrí que podía construir otra solución de la ecuación $x^4 + y^4 = z^2$ con valores no nulos más pequeños de x, y y z. Prosiguiendo de este modo llegué a la conclusión de que si la ecuación admitía alguna solución, podría ser resuelta también con los números enteros no nulos más pequeños posible, $x = 1$, $y = 1$, los cuales, evidentemente, no son soluciones. Por consiguiente no puede existir ninguna solución para $x^4 + y^4 = z^2$ y en particular tampoco para $x^4 + y^4 = z^4$.

—Muy perspicaz —comenté yo—.



"El matemago que le ganó la batalla a un problema de tres siglos y medio" rezaba un titular acerca de la demostración del último teorema de Fermat. El gran matemático francés en persona vino en la Máquina del Tiempo a visitar a Ian Stewart mientras éste reflexionaba sobre la gran noticia

Así, pues, los únicos casos por estudiar son aquellos en los que n es número primo impar. Usted demostró también el caso $n = 3$, el de la suma de dos cubos. Independientemente, el matemático suizo Leonhard Euler demostró esos mismos dos casos $n = 3$ y $n = 4$. Peter Lejeune-Dirichlet demostró el caso $n = 5$ en 1828, y también lo hizo Adrien-Marie Legendre en 1830. En 1839 Gabriel Lamé quiso demostrar el caso $n = 7$. Cometió algunos errores, que serían corregidos más tarde.

—¿Así que al cabo de dos siglos sólo estaban resueltos los casos n = 3, 4, 5, y 7? ¿No tuvo nadie una idea más general?

—Sí, Lamé, en 1847. Lamé afirmaba tener una demostración para todos los valores del exponente n. Pero Ernst Kummer descubrió un error, un error muy interesante que indicaba el camino de futuros progresos. La estrategia general de Lamé resultó ser muy fructífera, pero su táctica era muy inadecuada.

—¿Y en qué consistía esa estrategia?

—En introducir nuevas clases de números, los llamados números algebraicos, que son más generales que los meros números enteros. Se llaman así por ser soluciones de ecuaciones algebraicas, aunque los detalles no vienen al caso. Cuando n es impar, la suma $x^n + y^n$ es expresable como producto de otras dos. Por ejemplo, cuando $n = 5$ se tiene

$$x^5 + y^5 = (x + y)(x^4 + x^3y + x^2y^2 + xy^3 + y^4)$$

"El factor $x + y$ es bonito y sencillo, pero el otro es complicado. Lamé observó que con sus números algebraicos podía descomponer el factor complicado en producto de cuatro factores más sencillos. En general, podía expresar la suma $x^n + y^n$ mediante un producto de n términos sencillos. Además, el producto de tales términos era una potencia n-ésima perfecta, porque $x^n + y^n = z^n$. Observó también que ningún par de tales términos poseía un divisor común. Ahora bien, al manejar números enteros ordinarios, si un producto de términos sin divisores comunes es una potencia n-ésima, entonces cada término, individualmente, es una potencia n-ésima. Esta afirmación es consecuencia directa de que todo número es descomponible de modo *único* en producto de factores primos. Lamé dio por supuesto que los números algebraicos gozaban de esa misma propiedad. De ser así, en lugar de tener sólo la ecuación que usted planteaba, tenía n ecuaciones diferentes, cada una de las cuales decía que uno de los n términos es una potencia n-ésima. Y todas ellas habían de ser ciertas a la vez. Todo eso es pedir demasiado, y Lamé, nada sorprendentemente, pudo deducir que no existía ninguna solución.

—Hum... También se me habían ocurrido ideas parecidas. Pero...

—Pero no es tan sencillo, ¿verdad? —interrumpí—. Kummer y otros señalaron que en el caso $n = 23$, los números algebraicos de Lamé admitían más de una descomposición en producto de primos. Es algo muy curioso, y los cálculos bastante peliagudos... Puedo mostrárselos si quiere.

Me indicó con la mano que prosiguiera.

—Kummer se preguntó por qué admitían los números algebraicos más de una descomposición en factores primos y acabó descubriendo que podía solventar la cuestión introduciendo un artilugio de tipo completamente diferente, los que llamó "números ideales", que proporcionaban algunos factores primos "extra" para que todo funcionase perfectamente. Como puede ver, las cosas ya se han complicado y vuelto bastante abstractas, pero ésa es inevitablemente la forma en que funcionan las matemáticas.

"En 1847 Kummer se había servido de su teoría de ideales para resolver la conjetura para todos los valores de n menores que 100, exceptuados los casos n = 37, 59 y 67.

Añadiendo a la maquinaria matemática algunos accesorios, Kummer y Dimitri Mirimanoff resolvieron también esos casos en 1857. Aplicando métodos similares, en 1992 estaban resueltos todos los casos con n menor o igual que un millón.

—Pero casi todos los números son mayores que un millón —objetó Fermat—. Mientras se vaya caso por caso nunca se logrará resolver el problema completo.

—No, desde luego. Aunque, claro, en algún momento alguien podría haber observado algo que resolviera del todo la partida. Pero no fue así; lo único que se tenía eran casos cada vez más intrincados. Lo que hacía falta era una nueva idea. Y ésta llegó por una senda bien diferente. Los estudiosos empezaron a preguntarse cuántas soluciones podría tener una ecuación diofántica. Las hay que tienen infinitas soluciones, como la ecuación pitagórica. Otras no tienen, una vez despreciadas las soluciones triviales, ninguna, como ocurre con su ecuación cuando $3 \leq n \leq$ un millón. Y otras aún tienen sólo un número finito, como la $y^2 + 2 = x^3$, cuya única solución con enteros positivos es $x = 3$, $y = 5$.

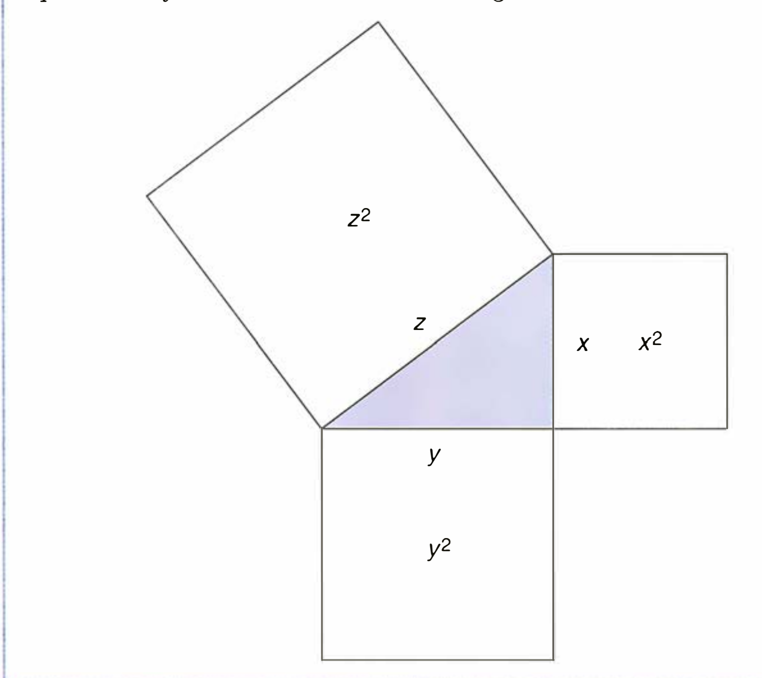
"En 1922 el matemático inglés Leo Mordell trató de averiguar en qué se diferenciaban estas tres posibilidades y empezó a reconocer un posible patrón. Mordell observó que, si se consideran todas las soluciones que admite una tal ecuación con números complejos —soluciones de la máxima generalidad, sin hipótesis previas de que hayan de ser números enteros—, las soluciones forman una superficie topológica. La superficie tiene un número finito de "agujeros", como una rosquilla o una "trenza" de bollería. Lo que más le llamó la atención fue que las ecuaciones que admitían infinitas soluciones con números enteros daban siempre, al resolverlas con números complejos, superficies sin agujeros o con uno a lo más. Parecía existir así una relación entre la topología y la aritmética.

"Se trataba de una conjetura osada, pues nadie veía la forma de establecer una conexión sólida entre dos ramas de las matemáticas tan alejadas. Pero tan convencido estaba Mordell, que publicó la que hoy se conoce por conjetura de Mordell, que afirma que las ecuaciones que originan superficies con dos o más agujeros poseen sólo un número finito de soluciones con números enteros.

Fermat dio signos de perplejidad: —¿Y qué relación tiene eso con mi conjetura?

Triángulo pitagórico

Para resolver la ecuación pitagórica $x^2 + y^2 = z^2$, se toman números enteros cualesquiera k, u, v. Sean $x = k(u^2 - v^2)$, $y = 2kuv$ y $z = k(u^2 + v^2)$. Se tiene entonces una solución. Sea, por ejemplo, $k = 1$, $u = 2$, y $v = 1$. Entonces $x = 3$, $y = 4$ y $z = 5$; o $k = 1$, $u = 3$, y $v = 2$, con lo que $x = 5$, $y = 12$, $z = 13$. Este método genera todas las soluciones.



—El número de agujeros de la superficie correspondiente a la ecuación $x^n + y^n = z^n$ es de $(n - 1)(n - 2)/2$, y para $n \leq 3$ este número vale al menos dos. Por tanto, la conjetura de Mordell implica que en caso de que la ecuación de usted tuviera alguna solución entera, habría de tener como mucho un número finito de ellas.

Fermat parecía estar más desconcertado todavía: —Pero si x, y, z forman una solución, también la formarán $2x$, $2y$ y $2z$, o $3x$, $3y$ y $3z$, y así sucesivamente. Habría infinitas soluciones.

—Perdón. Debí haber dejado claro que Mordell se refería a soluciones que no fueran proporcionales.

—Ya veo.

—Sigamos, pues. Ahora es cuando se produce el primer avance importante. En 1962, Igor Shafarevich dio a conocer una nueva conjetura sobre ecuaciones diofánticas, pero su enunciado es bastante técnico, la verdad. En 1968, A. N. Parshin demostró que la conjetura de Shafarevich implica la conjetura de Mordell. Por fin, en 1983, el joven matemático alemán Gerd Faltings demostró la conjetura de Parshin y, en consecuencia, también la de Mordell. Lo cual significa que la conjetura enunciada por usted es casi cierta: si para algún valor de n se dan excepciones, el número de éstas sólo podrá ser finito. La demostración de Faltings hubiera sido del gusto de usted, pues se sirve de una variante del método de descenso infinito que usted inventó.

—¡Ah!

—Aunque aplicada a objetos muy abstractos, conocidos por variedades abelianas.

—Vaya. Aun así resulta gratificante ver que mi sencilla conjetura ha originado tan gran número de nociones matemáticas nuevas, potentes y profundas.

—Así ha sido. Se puede objetar, desde luego, que un número finito de soluciones no es lo mismo que ninguna solución, y la objeción es perfectamente válida. Pero hay que reconocer que la reducción desde un número potencialmente infinito de soluciones a un número finito como máximo es un gran avance. Poco después, D. R. Heath-Brown modificó el método de Faltings y logró demostrar que la proporción de enteros n para los cuales es cierto el último teorema tiende al 100 por ciento cuando n se hace cada vez más grande. Así que el "último teorema" de usted es verdadero "casi siempre".

Fermat sonreía complacido: —A mí me parece que puede ser tenido éste por un resultado general, aunque quizás un

tanto inconcreto, pues no especifica qué valores de n son excepcionales.

—Correcto. Seguía haciendo falta una idea más concreta. Y ésta llegó de una teoría muy hermosa que anida en el corazón mismo del análisis moderno de las ecuaciones diofánticas, la llamada teoría de curvas elípticas.

—¿Qué curvas son ésas?

—Son curvas definidas por ecuaciones de la forma $y^2 = ax^3 + bx^2 + cx + d$, o sea, un cuadrado perfecto igualado a un polinomio cúbico. Se las llama "elípticas" a causa de una conexión bastante vaga con el problema de hallar una fórmula para el perímetro de una elipse, y son "curvas" porque cada ecuación define una curva geométrica en un sistema de coordenadas cartesianas. Una de las propiedades más notables de las curvas elípticas es que, dadas unas cuantas soluciones enteras de la ecuación, es posible combinarlas y deducir de ellas otras soluciones. Existe una construcción geométrica para obtener nuevas soluciones a partir de las antiguas.

"Las curvas elípticas fueron una de las cosas que estimularon a Mordell a formular su conjetura, porque las superficies asociadas a ellas tienen un solo agujero o ninguno. Con el paso de los años ha sido desarrollada una teoría muy sólida de las curvas elípticas. Se podría decir que constituyen la única parcela de la teoría de ecuaciones diofánticas que es comprendida francamente bien. Aunque también en este campo hay problemas de importancia que están por resolver, el principal de los cuales es la conjetura de Taniyama-Weil. Afirma este teorema que toda curva elíptica es representable mediante funciones modulares, que son una especie de amplia generalización de las funciones trigonométricas usuales, los senos y cosenos. Su significado es que toda curva elíptica admite una especie de sistema de coordenadas elegante.

"Estamos ya en el último tramo. A principios del decenio pasado, Gerhard Frey, de la Universidad de Saarbrucken, logró establecer una conexión crucial entre el 'último teorema' y las curvas elípticas. El razonamiento de Frey seguía esta línea: supongamos que exista una solución $X^n + Y^n = Z^n$ de la ecuación. He utilizado letras mayúsculas para indicar que estamos pensando en una solución particular. Deseamos demostrar que no existe tal solución; lo que se hace entonces es suponer que sí existe y esforzarnos en llegar a una contradicción. No importa cuál sea la contradicción.

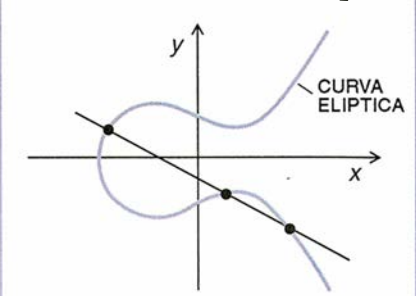
—Reductio ad absurdum —declaró Fermat.

—En nuestros días lo llamamos "demostración por contradicción", pero viene a ser lo mismo. Frey atendió a una sugerencia de Jean-Pierre Serre, del Collège de France en París, y examinó la curva elíptica $y^2 = x(x - X^n)(x - Y^n)$. Al aplicar a ese fin la teoría general de curvas elípticas descubrió que la hoy conocida por curva elíptica de Frey es un bicho muy curioso. Tiene una serie de propiedades muy extrañas; tanto, que parece muy improbable que semejante bestia pueda tener existencia real, lo cual, desde luego, es precisamente lo que se desea demostrar. En 1986, Kenneth Ribet, de la Universidad de California en Berkeley, dio forma precisa a la idea de Frey. Demostró que, si la conjetura de Taniyama-Weil es verdadera, la curva elíptica de Frey no puede existir. Con ello quedaría completamente demostrado, por contradicción, el último teorema.

"Ese descubrimiento fue importante, verdaderamente importante. Dice que la conjetura de usted no es una mera casualidad, no es un caso aislado, sino, por el contrario, que se encuentra en el meollo mismo de la moderna teoría de números, a saber: la conjetura de Taniyama-Weil. Siendo niño, Andrew Wiles había intentado demostrar el último teorema de Fermat. Convertido en matemático profesional, llegó a la conclusión de que se trataba de un problema aislado, sin otra importancia que su notoriedad. Pero cuando Wiles supo del trabajo de Ribet, decidió entregarse a la búsqueda de una demostración. Se dio cuenta de que no era necesaria toda la potencia de la conjetura de Taniyama-Weil para que el método funcionase; solamente se necesitaba un caso particular, válido para las llamadas curvas elípticas semiestables. Descompuso el problema en seis partes, que fue resolviendo una por una hasta que sólo una se le resistía. Entonces, una disertación de Barry Mazur, de la Universidad de Harvard, sobre un asunto totalmente diferente le hizo concebir la idea que le dio la pista definitiva. En un artículo de 200 páginas, Wiles reunió maquinaria suficiente para demostrar el caso particular de la conjetura Taniyama-Weil. Esto es, Wiles consiguió demostrar el caso semiestable de Taniyama-Weil, que implica que el razonamiento de Ribet demuestra que la curva de Frey no puede existir... y que usted tenía razón desde el principio. ¡Siete años le ha llevado!

Fermat asintió sabiamente: —¿Y ha sido esta demostración comprobada por otras personas? Sé por experiencia propia lo fácil que es cometer errores...

Puntos sobre una curva elíptica



Una curva elíptica típica es interceptada en tres puntos por una línea recta. Si las coordenadas de dos de tales puntos corresponden a soluciones enteras de la ecuación diofántica asociada, lo mismo ocurre con las coordenadas del tercer punto. Para construir nuevas soluciones a partir de las antiguas se toman dos soluciones, se traza la recta que une los puntos correspondientes y se calculan las coordenadas del tercer punto en el que esta recta corta a la curva.

—No con total y absoluto detalle. Pero un número sorprendentemente grande de expertos están dispuestos a declarar ahora mismo que la consideran válida. Mazur ha resumido así la opinión general: "Suena a verdad."

Bien, ya he cumplido mi parte; ahora le toca a usted. ¿Tenía realmente una demostración?

—Bueno... la cosa fue así —empezó a decir Fermat—. Yo...

En ese momento la Máquina del Tiempo empezó a temblar, a esfumarse y reaparecer —¡Vaya! El Viajero del Tiempo me previno que podría pasar esto. A menos que regrese inmediatamente a mi época me quedaré varado aquí eternamente. ¡Adiós!

Y antes de que yo pudiera hacer nada, Fermat saltó a bordo, tiró de la palanca y desapareció. ¡Qué decepción! Las abejas zumbaban a mi alrededor.

—¡Vamos, zángano, despierta! —era mi esposa.

—¿No has visto una Máquina del Tiempo? —pregunté yo, todavía confuso. No, no es nada —me apresuré a añadir—. Sólo un sueño...

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL ULTIMO TEOREMA DE FERMAT, Harold M. Edwards, *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1978, págs. 44-52.

THE PROBLEMS OF MATHEMATICS. Ian Stewart. Oxford University Press, 1992.

FERMAT'S LAST THEOREM FINALLY YIELDS. Barry Cipra *en Science*, Volumen 261, páginas 32-33; 2 de julio de 1993.

Libros

Angel Romo, Ramón Margalef y Luis Alonso

Farmacia vegetal

Riesgos de una moda

MEDICINAL PLANTS OF INDIA, por S. K. Jain y Robert A. DeFilipps. Reference Publications Inc.; Michigan, 1991.

MURDER MAGIC AND MEDECINE, por John Mann. Oxford University Press; Oxford, 1992.

CULTIVATION AND PROCESSING OF MEDICINAL PLANTS, dirigido por L. Hornok. John Wiley & Sons; Chichester, 1992.

ADVERSE EFFECTS OF HERBAL DRUGS. Dirigido por P. A. G. M. de Smet, K. Keller, R. Hänsel y R. F. Chandler. Springer-Verlag; Berlín, 1992-1993.

Si hasta tiempos muy recientes el mundo de las plantas medicinales parecía que iba a sucumbir ante los preparados sintéticos y los compuestos de laboratorio, con menos impurezas y con concentraciones más fiables que los productos naturales, se ha visto que esto no ha sido así y ello es debido a varias causas.

En primer lugar las plantas medicinales se encuentran en la farmacopea de la naturaleza, son de fácil acceso y constituyen un elemento que forma parte de las diferentes culturas. *Medicinal Plants of India*, de S. K. Jain y Robert A. DeFilipps, es un buen ejemplo en este sentido, por múltiples razones. Constituye un vademécum muy completo y metódico de las plantas utilizadas en aquel país. Estas se ordenan alfabéticamente por familias; dentro de cada familia, las especies se mencionan con su nombre latino y autor; siguen los nombres vulgares asignados en las diferentes zonas de la India, la parte que se emplea de la planta y la dolencia o enfermedad que combate. Todo ello explicado de una forma muy sucinta y sintética. Numerosas ilustraciones facilitan la identificación de las plantas; se dibuja al menos una planta por familia. El número de especies referenciado es de unas 1700 y el de ilustraciones a toda página unas 300. Ello ha obligado a los autores a dividir la obra en dos volúmenes. Por último, y pensando en una consulta pronta y ágil, han añadido tres índices: medicinal (de enfermedades y remedios), nombres vulgares y nombres latinos.

Esta obra tiene además el interés añadido de conocer las utilidades otorgadas en la India a algunas plantas nuestras, y de forma recíproca, conocer el uso de plantas que aquí poseemos como exóticas. Ambos volúmenes forman parte de una colección de plantas medicinales del mundo, redactados por diferentes especialistas en la materia, y que constituyen una síntesis muy importante sobre las plantas medicinales.

La obra de John Mann *Murder Magic and Medecine* incide en un aspecto muy diferente, pero que a la vez nos incita a reflexionar sobre la farmacopea natural. Se trata de un estudio de las propiedades biológicas de los principios activos de las plantas y de su modo de actuar en el hombre. Por el título de la obra se puede pensar que se trata de algo banal, una vulgarización del tema, pero su lectura nos muestra una cosa totalmente distinta.

Es un libro muy bien escrito, con apariencia divulgativa aunque respaldado con documentación seria y rigurosamente científica. Inicia la introducción con algunos conceptos básicos de farmacología y de fisiología vegetal. En el apartado de plantas letales se estudian diferentes especies con este efecto; lo inicia con el curare, donde a partir de una planta altamente venenosa se explica la historia de su descubrimento y todo el proceso de cómo se llegaron a conocer sus efectos, los experimentos que se realizaron al respecto, su funcionamiento y una detallada descripción de su acción fisiológica y dosis letales. El mismo método es aplicado para describir los venenos clásicos de los alcaloides de tropano, las toxinas de reptiles y de microbios.

En el apartado de plantas mágicas, destacan las estimulantes. Vale la pena resaltar la descripción de estimulantes suaves como el cacao y enérgicos como la coca. De esta última se comenta de forma exhaustiva su acción fisiológica. Pero el mayor hincapié se hace en la farmacopea autóctona: entre ellas varias solanáceas, o la mágica *Amanita muscaria*, hongo común en nuestros bosques. El autor destila una sutil ironía en parte de sus comentarios sobre la historia y usos de algunas de estas plantas. Así en el caso de la *Datura*, salen a relucir las brujas, el sabbat y los defensores de la ortodoxia. A propósito del efecto de la belladona, comenta un fragmento de *Romeo y Julieta* para poner de manifiesto que Shakespeare conocía muy bien cómo actuaba esta planta.

El nuevo mundo supuso una entrada masiva de nuevas plantas alucinógenas: peyote, capi, etcétera, cuyos efectos se analizan pormenorizadamente. A la par se comentan otros compuestos más suaves, como el tabaco o la absenta. En el tercer apartado, el de uso medicinal de las plantas, se incluye una breve historia de la farmacología. Seguido de las sustancias empleadas como antibacterianas. Drogas que inciden en la función reproductora, corazón y circulación, sistema nervioso central, antialérgicas y anticancerosas. Por último se comenta la importancia de algunas plantas en la inhibición del virus de la inmunodeficiencia humana. Y las perspectivas halagüeñas de cara al futuro, quedando aún muchos interrogantes por resolver. El autor ha abordado de forma amena y atractiva un tema que entraña especial dificultad, el del mecanismo fisiológico de las principales especies terapéuticas.

Si se conocen cuáles son y qué acción fisiológica tienen, el siguiente paso es obtenerlas. Para ello nada mejor que poderlas cultivar. La obra dirigida por L. Hornok, *Cultivation and Processing of Medicinal Plants*, es muy útil en este sentido. En ella se expone la experiencia, nada desdeñable, acumulada en un país, Hungría, donde el cultivo de las plantas medicinales es muy importante. En él se recolectan del orden de 40.000 toneladas/año. Tal volumen de producción requiere cuidadosas técnicas de cultivo, para no esquilmar la rebotica de la naturaleza.

Comienza su andadura con las ha-

bituales páginas académicas sobre la definición y el papel de las plantas medicinales. Continúa con aspectos biológicos relativos a la herencia y variabilidad, taxonomía, factores ambientales y control de variedades. Más prosaicos pero realmente interesantes, pues no hay mucha bibliografía al respecto, son los apartados sobre recolección de las plantas, su secado, almacenamiento, extracción de aceites esenciales, empaquetado y certificado de origen, puntos donde sobresale la experiencia de Hungría en manipulación de las plantas.

La parte más voluminosa de la obra corresponde a la explicación del cultivo de 49 plantas medicinales. Para cada una de ellas se comentan las características que tiene, los requerimientos ambientales de su cultivo, la preparación del suelo, la propagación, el cuidado de la plantación y la recolección. Reviste, pues, un gran interés en un país como el nuestro, con grandes extensiones de tierras marginales en las que el cultivo de plantas medicinales puede ser, en determinados casos, una opción a tener presente, y una alternativa a los monocultivos cerealistas.

Pero la ola verde en que se inscribe el renacimiento de la materia médica vegetal debe estar contrarrestada con un estudio puntilloso de los efectos que produce el uso de muchas plantas. La sordina la hallará el lector en *Adverse Effects of Herbal Drugs*, una serie de trabajos que se compendian en dos volúmenes bajo la batuta de P. A. G. M. de Smet, del Centro de información farmacológica de La Haya. Lejos de una militancia en contrario, los autores aceptan el armamentario terapéutico de los vegetales, pero con discreción suficiente, la que les otorga un exhaustivo análisis químico de los principios activos. Como los médicos que recurren, en determinadas circunstancias, a la fuerza sanadora de la palabra, aceptan éstos incluso la eficacia psicológica que en muchos pacientes tienen las recetas vegetales.



Cedrus deodara *G. Don. Se emplea su corteza para remediar diarreas, disentería y fiebres. El aceite que se extrae de este árbol se aplica para la curación de úlceras y enfermedades de la piel. La litografía está hecha sobre una pintura realizada por Lady Canning, esposa del que fue gobernador general de la India a mediados del siglo pasado*

El género *Aristolochia,* por ejemplo, constituye uno de los carcinógenos más potentes y débese andar con tiento en el uso de cualquiera de las 67 especies del mismo que se han venido empleando para remediar enfermedades. Se ha registrado envenenamientos anticolinérgicos por inclusión de atropina en determinados productos de herboristería en que la principal droga botánica era *Arctium, Urtica, Symphytum officinale* o *Malva*. Especie a especie, de los socorridos ajos e hinojos al más exótico *Cymbogopogon*, aportan un refinado análisis botánico, químico y farmacológico de la planta y sus derivados que preparan al lector para entender sus contraindicaciones experimentadas en animales o descubiertas en humanos.

La Comunidad Europea y distintos países han legislado sobre el uso prudente de los remedios vegetales, señalando lo aprovechable y lo desechable de cada especie. Por retomar el ejemplo del hinojo, en Estados Unidos se admite en farmacia el empleo de sus semillas; de la valeriana, su rizoma; de la rosa, el fruto y el botón. Un índice de plantas y compuestos químicos ayudan a encontrar la especie recomendada o no recomendable. (A. R.)

Ecología y cultura

Pobreza teórica

EVOLUTIONARY ECOLOGY AND HUMAN BEHAVIOR. Dirigido por Eric Walden Smith y Bruce Winterhalder. Aldine de Gruyter; Nueva York, 1992.

La *Sociobiology: The New Synthesis*, de E. O. Wilson, aparecido en 1975, fue y es, sin duda, un libro importante, que levantó más ruido que deseos de luz. Las aproximaciones más razonables al espinoso tema toman en cuenta la excepcional rapidez de la evolución cultural, que, en la práctica, ha suplantado en buena medida a la genética. La evolución cultural se apoya en el dominio del entorno y especialmente en los recursos energéticos —lo que raramente se hace constar—. La importancia de la evolución cultural se hizo notar y se analizó por Lumsden y Wilson (1981) y por Richerson y Boyd (1985). Estos últimos firman uno de los capítulos que más me gustan de la presente compilación, titulado "Cultural Inheritance and Evolutionary Ecology".

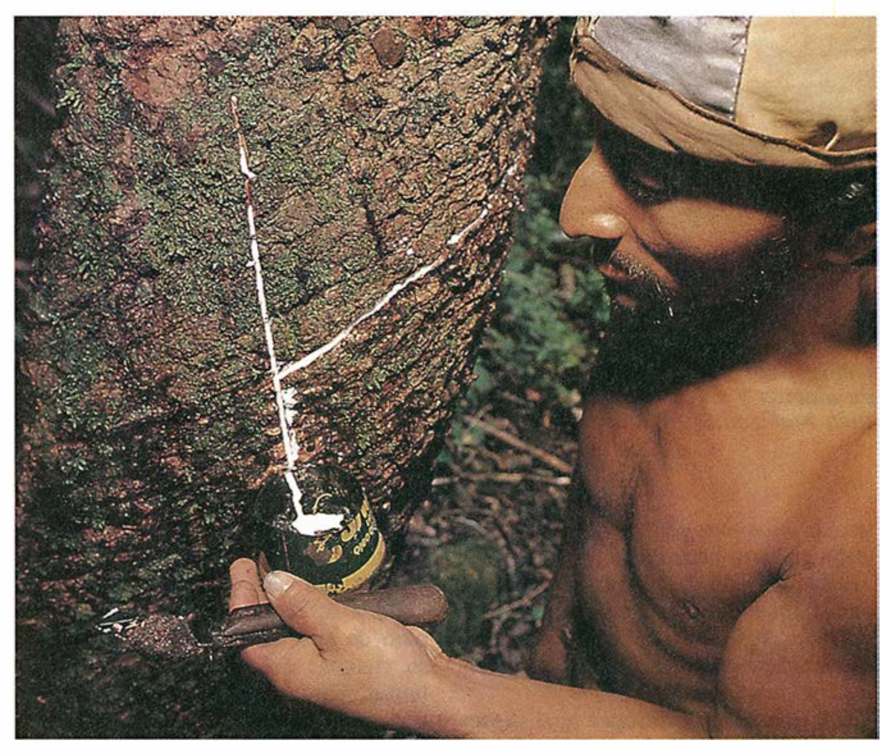
Este libro consta de 12 capítulos, con un conjunto de 14 autores. Los capítulos están distribuidos un tanto arbitrariamente en cuatro partes, tituladas respectivamente: 1 Fundamentos teóricos, 2 Parientes próximos, 3 Recursos, trabajo y espacio, 4 Reproducción y relaciones sociales. Los editores, en el prefacio, hacen notar que este volumen no es el resultado de un simposio, sino que ha sido escrito expresamente por sus autores para tratar de encontrar cierta coherencia en las formas de interpretar las aplicaciones de la teoría de la evolución a la dimensión humana del comportamiento, en aspectos significativos del campo de la ecología, pero sin referirse expresamente a la psicología evolutiva ni a la sociobiología.

El volumen contiene bastante material informativo en apoyo de distintas teorías y puntos de vista. Para el gusto del referente hacen un uso excesivo de la teoría de las Estrategias Evolutivamente Estables, según Maynard Smith, con aplicación reiterada de los diversos modelos; el famoso dilema del prisionero y algunas otras estrategias (halcones y palomas, etcétera) están demasiado repetidos. Este proceder supone al lector convencido de la validez del método y de estos modelos o de su compatibilidad con la continua adquisición de información por la evolución biológica y la cultural. Y se comprende por el deseo de mantenerse en un terreno de estrategias aplicables tanto en el campo de la genética como en el del comportamiento, sin tener que pronunciarse necesariamente por el campo elegido, lo que, por otra parte, tampoco se pediría de los autores.

Como ocurre con libros de este tipo se recurre cansinamente a ejemplos de "sociedades primitivas" y sobados relatos de antropólogos. Pero la verdad es que las circunstancias de la vida moderna, con sociedades muy numerosas, amplio uso de la energía exosomática y de la moneda y del crédito, se prestarían mucho mejor a la consideración de estrategias de competición, más o menos estables y más estudiables como tales, que volver una y otra vez a desempolvar las ESS (Evolutionary Stable Strategies) y aplicarlas solamente a "sociedades primitivas".

B. Winterhalder y E. A. Smith, que escriben los dos capítulos iniciales, pretenden limitarse al método hipotético-deductivo y consideran que Lack y MacArthur fueron pioneros en la búsqueda de relaciones entre evolución y ecología. Reconocen la contribución de Wynne Edwards en lo que se refiere a la percepción de la densificación de las poblaciones, y su significado, pero no se atreven a ir mucho más allá, tal vez porque el autor citado fue muy combatido por la ortodoxia.

En todo el texto abundan diagramas exploratorios, la mayoría sin datos de base, destinados generalmente a ilustrar algunos procesos de supuesta regulación; se habla relativamente poco de los territorios. Quizá, después de todo, se trata más de monos que de la humanidad. Algunos de los temas se intentan estudiar —con éxito variable— dentro del marco de las modas de la ecología teórica actual —*foraging theory, ESS*, aplicación de programación lineal a la evaluación de las dietas compuestas, "time and resource allocation", "trade offs", con inevitables perogrulladas, por el estilo de que cuanto mayor es la relación numérica entre consumidores y productores, en una sociedad sin energía extra, más tienen que trabajar los productores. Sin embargo, los comentarios sobre la regulación del número de individuos en cada grupo social, un tema que aparece en diversos contextos, resultan más estimulantes. La tragedia de la explotación del común se continúa con el relativo parasitismo del haragán en toda empresa colectiva. Los cambios en la distribución numérica de los individuos por clases sociales en el Reino Unido, con el paso de las generaciones, muestra que, a pesar de las ventajas que puedan tener los ricos, los pobres aumentan relativamente más en la población total. Para tal viaje no hacían falta alforjas.



Extracción de látex en la Amazonía

El libro puede ayudar a construirse un transfondo teórico (oscilando en-

tre la genética y la cultura, pero más inclinado hacia esta última) en el que situar el desarrollo histórico de las sociedades humanas y de las formas de comportamiento social; pero, como se ha dejado entrever, sus capítulos se mantienen —quizá prudentemente— alejados de la problemática actual, con su invento del dinero, de la especulación, su dominio de la energía y la multiplicación de toda suerte de artefactos y estructuras exosomáticas, todo esto acompañado de la increíble dilatación del gradiente existente entre mayor riqueza y la miseria más abyecta. Este es el *tema* más apasionante y más conmovedor que, tal vez, ha de ser asumido por una nueva generación. (R. M.)

Técnica del siglo XX

De la radio al láser

LEE DE FOREST AND THE FATHERHOOD OF RADIO, por James A. Hijiya. Lehigh University Press; Bethlehem, 1992.

BOFFIN. A PERSONAL STORY OF THE EARLY DAYS OF RADAR, RADIO ASTRONOMY AND QUANTUM OPTICS, por R. Hanbury Brown. Adam Hilger; Bristol, 1991.

THE LASER IN AMERICA, 1950-1970, por Joan Lisa Bromberg. The MIT Press; Cambridge, 1991.

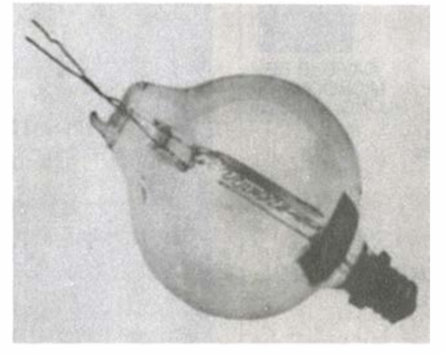
Muy pocos, a bote pronto, asociarían uno de los principales inventos del siglo XX al nombre de Lee de Forest (1873-1961), prototipo excelente de la generación que creó la grandeza de Estados Unidos: trabajador tenaz, fiado en sus propias fuerzas, ambicioso de fama y dinero, convencido de que los avances de la ciencia y la técnica, y no las leyes o los nuevos planes de estudio, transformarían la sociedad. De Forest era de los que pensaban, en los años treinta, que el desarrollo de la aviación disuadiría cualquier veleidad belicista ante la presumible contundencia de la nueva arma, o que la televisión, en cuya invención él participó (se autoarrogaría el título de "abuelo" de su alumbramiento y el de "padre" de la radiodifusión), se dedicaría a elevar el nivel cultural de los espectadores. Era una generación que se entregó a la utopía del darwinismo social con el entusiasmo del neoconverso y tuvo las obras de Aldous Huxley y Herbert Spencer por lectura de cabecera.

Hijiya bosqueja la biografía de Forest sin la menor simpatía aparente. Diríase que se propone volver del revés la idealizada autobiografía, *Father of Radio.* Todas las miserias de Lee se hilvanan en un estilo duro, agrio. En demasiadas páginas el sablista empedernido, el litigante y el misógino de toscos modales vela el inventor constante, y cuando no le queda otro remedio que referirse a una nueva patente lo hace con desgana, como si temiera perder objetividad.

De Forest empezó a los trece años a construir en miniatura remedos de las máquinas que aparecían en las revistas populares *Monitor* y *Merrimac*: altos hornos, locomotoras, castillos con fosos y puentes levadizos, cardadoras de algodón y mil cachivaches más, que no siempre funcionaban. Su padre, un pastor congregacionista que deseaba siguiera sus pasos, hubo de ceder a la clara inclinación del joven, quien se matriculó, a los veinte, en el Colegio Sheffield de Ciencias de la Universidad de Yale.

No fue un alumno brillante en las clases teóricas, debilidad que más tarde se esgrimirá para no apoyar su candidatura al Nobel. Se aplicó con especial ahínco a la experimentación con la propagación de las ondas electromagnéticas, objeto de su tesis doctoral: "Reflexión de las ondas hertzianas desde los extremos de cables paralelos". Pero no hubo paréntesis que cerrara su inventiva, alimentada por un afán de convertirse en otro Edison o Tesla. A esos años mozos pertenecen su construcción de una "doble ilusión especular", un "generador de electricidad atmosférica" y un "fotoscopio".

Compatibilizó su primer trabajo profesional en la compañía Western Electric de Chicago con el desarrollo de un detector de las ondas hertzianas. Tras varios fracasos en la creación de empresas propias, patentó el detector que revolucionaría la telegrafía sin hilos y la radio: el "Audion". Se trataba de un tubo de vacío de triodos (una parrilla entre el ánodo y el cátodo), gracias al cual comprobó que podía controlar el fluido con muchísimo mayor rendimiento que si se limitaba a calentar el cátodo en el diodo, la válvula de diodo patentada dos años antes por John Ambrose Fleming. Ese dominio era todavía en buena parte coto privilegiado de Marconi, aunque los ensayos habían comenzado en el decenio anterior.



Audion de Lee de Forest. Se aprecia el tercer electrodo (rejilla) *entre el cátodo* (filamento) *y el ánodo* (placa)

La magia del cine, y sobre todo su afición a la música, le movió a idear, en 1920, un sistema óptico que registrara y reprodujera los sonidos de los diálogos. A ese ingenio de sicronización automática le llamó "Phonofilm", y sería muy parecido al que usaría muy pronto el cine sonoro. Confiaba en que la nueva técnica sirviera a la utopía, "que no se perdieran para siempre la imagen y las palabras de quienes podían guiar a la humanidad".

Del cine pasó a la televisión, para la que creó el "tele-film", que se apoyaba en un tambor rotatorio para un dispositivo mecánico de barrido, siguiendo la pauta establecida por C. Francis Jenkins. Contemporáneamente se aplicó al estudio de la diatermia, o calentamiento de los tejidos por el paso de una corriente, e ideó las máquinas diatérmicas. Y así, hasta más de trescientas patentes, la última, ya octogenario, correspondía a un teléfono automático.

Boffin es el apelativo cariñoso del empleado civil que pone su ingenio al servicio de la maquinaria de guerra hasta el punto de convertir sus creaciones en parte sustancial del poderío militar y que, en opinión de Robert Watson-Watt, encarnaba arquetípicamente R. Hanbury, cuya autobiografía corre paralela a uno de los logros más espectaculares de nuestro tiempo: *Boffin. A Personal Story of the Early Days of Radar, Radio Astronomy and Quantum Optics.*

El radar, acrónimo de las expresión inglesa que significa detección por radio de la distancia a que se encuentra un objeto, constituye un sistema electrónico que recurre a las ondas de radio con el fin de descubrir la presencia de objetos inalcanzables para el ojo humano, debido a su lejanía o falta de visibilidad (la noche o las nubes). Además de la distancia, determina la posición exacta de un blanco y, si éste se halla en movimiento, la velocidad y dirección en que avanza. Se funda en el "eco", que es la reflexión sufrida por las ondas de radio emitidas desde

una antena cuando chocan contra un avión, un buque o una montaña.

Su base teórica se retrotrae a Michael Faraday, quien predijo la existencia de ese tipo de ondas, y James Clerk Maxwell, autor de la teoría electromagnética de la luz. Heinrich Hertz comprobó experimentalmente la realidad de esa radiación. Y fue otro alemán, Christian Hülsmeyer, el que consiguió la primera patente en 1904, si bien la Marina germana lo desechó por ineficaz. Apenas si se logró progresar en sus prestaciones durante el primer tercio del siglo.

El radar va ligado estrechamente al desarrollo de la segunda guerra mundial. Nadie, sin embargo, sospechaba hasta qué punto condicionaría su curso, cuando mediados los años treinta, comienzo de la historia de Brown, un grupo de jóvenes sin iniciar el doctorado recibieron el encargo de conjugar en un mismo propósito habilidades ingenieriles y radioafición; en concreto, dar con un sistema detector de la aviación enemiga en su avance hacia la costa inglesa. En 1936 la única forma de descubrir la incursión era la detección acústica, aparte de la red de observadores en tierra comunicados por teléfono. Pero sus limitaciones eran obvias. Para cuando un detector de sonido descubría la presencia del avión, éste se hallaba ya a miles de millas de su posición original. Las ondas de radio, por contra, viajan un millón de veces más deprisa que las ondas sonoras; era imprescindible contar con un ingenio detector de radioondas. Algunos iban más lejos y soñaban con la creación de intensos rayos de ondas de radio que anularan la aviación enemiga.

El contraste entre la imaginación y la realidad de los medios de entonces era abismal. Bastante había con observar el primer eco e ir gradualmente ensanchando el alcance. "Todo lo que teníamos era un osciloscopio, un polímetro y un ondámetro, más propios de un museo de la técnica (que de un grupo ultrasecreto). Ni siquiera disponíamos de generador de señales. Por lo que respecta a la bibliografía, sólo recuerdo haber visto por allí un ejemplar del *Radio Amateur's Handbook*."

Tras el primer eco, llegó el primer ejercicio aéreo con estación de radar en tierra. Luego, el primer sistema incorporado a bordo, para lo que tenía que salvarse el escollo de la potencia transmisora. Los refinamientos procedían con lentitud exasperante. Como ocurrió a propósito de la detección aérea de los buques en alta mar: ¿debía el radar barrer la parte frontal, los costados o el entorno del aeroplano? Desde el punto de vista operativo resultaba más eficaz barrer el contorno, pero desde el punto de vista técnico era aconsejable apuntarlo hacia el frente o los costados.

Había que dar muchos pasos todavía. Saltar, por ejemplo, de la defensa o mera detección a la caza de los bombarderos. Aplicar el sistema al reconocimiento nocturno o a la detección de submarinos. Fueron avances que coincidieron con cambios drásticos en los mapas de operaciones. Pero acabó la guerra y todo aquel arsenal de experiencias se ordenó hacia uno de los campos más fecundos de la ciencia contemporánea: la radioastronomía, que empezó detectando los ecos radáricos de las estelas ionizadas dejadas por lluvias de rayos cósmicos y levantando la primera cartografía celeste en ese intervalo de longitud de onda, donde aparecían estrellas de radio. En ese contexto nació el interferómetro que permitía medir el diámetro angular de las radiofuentes, logro por el que Brown ha pasado a la historia de la técnica.

También a la historia del láser, hijo del máser, que lo fue del radar de largo alcance. De la naturaleza del láser es producir luz coherente, semejante a la radiación coherente. Pero, ¿en qué consiste tal coherencia? No había acuerdo sobre la misma entre los ópticos de las postrimerías de los sesenta, si bien todos partían de la interferometría de intensidad ideada por Hanbury Brown junto con Richard Q. Twiss, quienes propusieron generalizar dicha técnica a la astronomía óptica. El interferómetro de intensidad óptico que se sugería constaría de dos detectores, distantes unos 200 metros entre sí, y focalizados en una misma estrella; la luz recibida en cada detector se convertiría en una corriente eléctrica, se cotejarían ambas corrientes y de las mediciones de su correlación se inferiría el diámetro estelar.

Aunque más tarde se comprobó la inadecuación de ese método para el caso del láser, no por ello pierde su carácter indicativo de la historia compleja de los sistemas que producen haces intensos de luz monocromática. Joan Lisa Bromberg la cuenta con sigular rigor y habilidad en *The Laser in America, 1950-1970*, tras un detenido estudio de los artículos técnicos e informes y largas entrevistas personales con medio centenar de los artífices del máser y el láser.

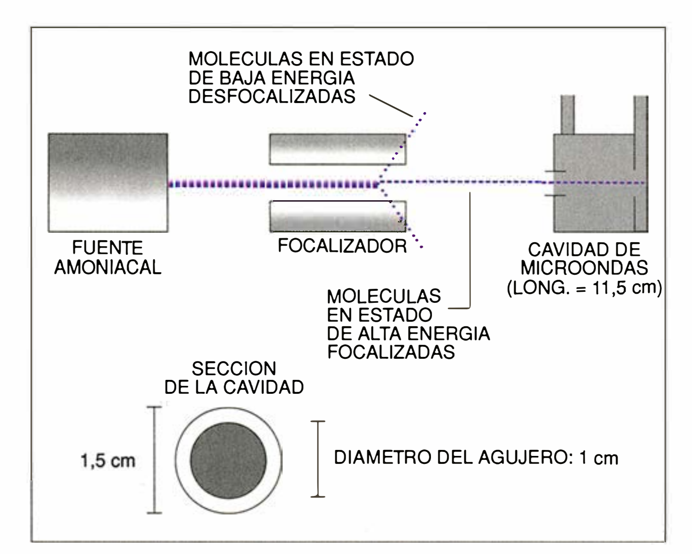




Diagrama esquemático del máser ideado por Charles H. Townes, quien aparece en la fotografía (izquierda) *con su colaborador James P. Gordon* (derecha) *mostrando un segundo prototipo del dispositivo en la Universidad de Columbia en 1955*

Ambos nacieron en cuna tejida con mimbres de euforia, fe en el progreso técnico y opulencia. En 1955, el presupuesto estadounidense para investigación, que había sido seis años antes de 2600 millones de dólares, se elevó a 12.400 millones de dólares para doblarse exactamente cuatro años más tarde. El mercado de la electrónica respondió con una demanda asimismo creciente. Otros factores que apuntalaron el despegue fueron la guerra de Corea y el miedo a la aparente superioridad soviética, evidenciada en el lanzamiento del *Sputnik*. La industria civil y militar de esas décadas, estrechamente imbricadas, se potenció con el desvío de cerebros desde la universidad hacia los laboratorios empresariales y la aparición de centros privados de excelencia, como el T. J. Watson de la compañía IBM, donde, además, el experto gozaba de amplia libertad para proseguir su propia investigación, tuviera o no ésta una aplicación práctica clara.

En 1950, la frontera de la generación de ondas de radio se hallaba en el rango del milímetro. Se habían conseguido radares de 3 centímetros e incluso de 1,25 centímetros, aunque con una notable pérdida de alcance. Vióse que el vapor de agua absorbía los haces de radar. Los espectroscopistas miraron entonces hacia la región del milímetro, o menos. En particular, Walter Gordy, de la Universidad de Duke, y Charles H. Townes, de Columbia. Empleaban tubos electrónicos que producían o aislaban armónicos (múltiplos enteros) de las frecuencias fundamentales de los tubos. Gordy dobló y triplicó la frecuencia fundamental de tubos de klistrón haciendo pasar la radiación a través de cristales de silicio; Townes recurría a guías de ondas para separar los armónicos de magnetrones. Si no mucho más, por los menos ofrecían niveles de potencia suficientes para los experimentos espectroscópicos.

Tales fuentes de radiación de microondas —tubos de electrones, klistrones, magnetrones y tubos de movimiento ondulatorio— presentaban, sin embargo, obvias limitaciones en los intervalos milimétricos y submilimétricos; a la dificultad que entrañaba su fabricación se sumaba la de disipar el calor generado durante su funcionamiento. Se precisaba un modelo radicalmente nuevo.

Townes sabía que los sistemas moleculares radian en longitudes de onda cortas, que esos sistemas existen en uno de una secuencia de estados mecanico-cuánticos de energía discreta y que pueden saltar del nivel energético inferior al superior mediante absorción de radiación electromagnética. Sabía también que el sistema instalado en un estado superior de energía podía emitir radiación de manera espontánea o de manera inducida, estimulada, saltando al estado inferior; en la emisión estimulada, al par que baja de nivel, añade energía al haz entrante. Podría crearse la situación anómala de inversión de la población, en que muchos sistemas ocuparan un nivel energético superior y amplificarse así el haz entrante.

A Townes se le ocurrió entonces una idea genial: encerrar los sistemas de estado superior en un resonador macroscópico para mantener la radiación de la frecuencia que emitían; las emisiones estimuladas se reflejarían en los sistemas, induciendo ulteriores emisiones, intensificando así la radiación; alcanzado un nivel suficiente de radiación, el aparato caería en una autooscilación, convirtiéndose en fuente de ondas milimétricas. Pensó que la molécula ideal sería ND_3. Así se gestó el máser, acrónimo de la expresión inglesa que significa amplificador de microondas por emisión estimulada de radiación.

Muchos intervinieron en su refinamiento, creación de nuevos tipos (máser de estado sólido) y aplicaciones. Muchos más disputaron la carrera por obtener el primer láser: traspasar la barrera submilimétrica del espectro y llegar a la radiación infrarroja e incluso de la región del visible. Townes participó con la ayuda de su cuñado Arthur L. Schawlow (uno y otro recibirían el Nobel de física en años distintos), autor ya de un libro celebrado, *Microwave Spectroscopy*, y con alguna incursión en el máser infrarrojo; menos tranquilizadoras a la larga serían sus conversaciones con R. Gordon Gould, quien por entonces (1957) estaba preparando su tesis doctoral sobre un máser óptico, o, como lo bautizó, sobre el láser (acrónimo inglés de "amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación"). Gould le puso pleito por la patente.

Las líneas de investigación se fueron acotando. Townes insistió en el láser de vapor de potasio, que se vería rodeado por múltiples inconvenientes, el de la corrosión uno de ellos. Schawlow optó por láseres de estado sólido (rubí mate). Ali Javan escogió un sistema de helio-neon. Pero Theodore Maiman ganó la partida con la construcción del primer láser funcional de rubí rosa. Vendrían inmediatamente otros más, como el láser de fluoruro de calcio. (L. A.)

Apuntes

Nota distintiva del microscopio de túnel de barrido es su alta resolución espacial. ¿Podría combinarse esta propiedad con la resolución temporal ultrarrápida? Puede obtenerse la resolución espacial en un tiempo de picosegundo sacándole partido a la no linealidad de la respuesta de alto voltaje de la punta. Se trata de convertir pulsos ópticos procedentes de la línea de demora de un láser en pulsos de potencial, mediante conmutadores fotoconductores. Cuando los pulsos coinciden en la unión, la corriente es mucho mayor que la mera suma aritmética de corrientes provinientes de cada pulso. Esta corriente sobrante aporta una señal dependiente del tiempo. Los experimentos muestran que podemos recurrir al microscopio de túnel de barrido para someter a prueba la dinámica a escala atómica en cuatro dimensiones, es decir, incluida la espacio-temporal.

El incremento en la concentración de calcio intracelular libera las vesículas secretoras retenidas en la superficie de la célula. Se ha comprobado que el aumento de Ca^{2+} controla también la conversión de vesículas secretoras en formas confinadas o prontas para su liberación.

Las uniones de intervalo ("gap junctions") son estructuras que permiten el tránsito directo de micromoléculas entre células. Hace más de diez años se sugirió que no era forzosamente necesario que el paso fuera igual en ambos sentidos. Un sencillo experimento lo ha confirmado. Se inyectaron biocitina y otro colorante fluoresceínico en los astrocitos que pasaron a los oligodendrocitos o a células de Müller; pero los colorantes inyectados en cualquiera de éstos no solían alcanzar los astrocitos.

La radioemisión de la magnetosfera de Júpiter guarda correlación con la fase de Io, el más interno de los satélites galileanos. Se ha atribuido ese fenómeno a la generación de corrientes eléctricas por el movimiento de Io a través del campo magnético del planeta. Pero quizá no sea ésa la última razón, a tenor de la observación según la cual habría retazos de emisión infrarroja en la vecindad de los polos de Júpiter, emisión que se concede a H^{3+} excitado y que surge en los puntos donde los tubos de flujo magnético conectados a Io completan un bucle de corriente a través de la magnetosfera de Júpiter. Se confía en que siguiendo esa línea de investigación se conozca mejor el origen de la radioemisión del planeta.

Los impulsores flagelares de muchas bacterias se insertan en los polos celulares; no se distribuyen al azar por el soma del microorganismo. Esos impulsores poseen un elemento estructural: el disco basal. Para justificar que el flagelo se dispersa y no daña la membrana en el punto de anclaje se ha ideado un modelo en el que una estructura espiral arquimedeana, el disco basal, cumple esas funciones. La conformación de una espiral, en comparación con los anillos concéntricos, necesita sólo un punto de desarrollo y se halla menos condicionada por el tamaño de los bloques componentes.

Los caminos para la adaptación son infinitos. *Riftia pachyptila* es un gusano tubular que vive junto a los humeros del océano profundo. Las bacterias intracelulares que medran simbiontes y quimioautotróficas aprovechan la oxidación del sulfuro procedente de los humeros como fuente de energía para fijar el CO_2. Las bacterias aportan, además, los nutrientes que necesitan sus huéspedes carentes de tubo digestivo. Se trata de un tipo de simbiosis descubierto en otras especies y en otros nichos. Se ha avanzado un paso más: las bacterias de *R. pachyptila* podrían satisfacer parte sustantiva de las necesidades respiratorias mediante el uso de nitratos. Estos se reducen a nitritos, lo que podría constituir el producto final (respiración de nitrato), o reducirse ulteriormente a gas nitrógeno (desnitrificación). Condición metabólica que podría desempeñar un papel importante en la colonización de hábitats hipóxicos.

La emisión de dióxido de azufre en las erupciones volcánicas podría ejercer un efecto determinante en el clima del planeta. A diferencia de las emisiones procedentes de otras fuentes, las de origen volcánico resultan difícil de medir dado su carácter episódico y violento. Sin embargo, gracias al estudio de la información recogida por el satélite *Nimbus*-7 entre 1978 y 1993 se ha podido calcular el flujo anual total de dióxido de azufre volcánico: de un 5 a un 10 por ciento del que corresponde a la actividad del hombre.